

Proyek StarRoad: koridor peluncuran elektromagnetik superberat dari Bumi ke antariksa

Daftar isi

Navigasi: [awal](#) | [daftar isi](#) | [akhir](#)

[1. Deskripsi, ciri utama, kemampuan, dan filosofi](#)

[1.1. Filosofi inti proyek](#)

[1.2. Kemampuan](#)

[2. Keunggulan dan landasan teknis, ekonomi, geografis, dan strategis](#)

[2.1. Teknis](#)

[2.2. Ekonomi](#)

[2.3. Geografis](#)

[2.4. Strategis](#)

[3. Landasan industri dan teknologi](#)

[3.1. Levitasi dan akselerasi magnetik \(maglev\)](#)

[3.2. Teknologi superkonduktor dan arsitektur terdistribusi](#)

[3.3. Daya pulsa](#)

[3.4. Teknologi vakum](#)

[3.5. Aerodinamika hipersonik dan perlindungan termal](#)

[3.6. Sistem tenaga nuklir](#)

[3.7. Pembangunan terowongan](#)

[3.8. Sistem energi termal panas bumi otonom](#)

[3.9. Pembakaran supersonik](#)

[3.10. Siklus bahan bakar tertutup untuk portal](#)

[3.11. Strategi validasi teknologi](#)

[4. Uraian rinci bertahap mengenai elemen dan teknologi StarRoad](#)

[4.1. Terowongan akselerasi dan infrastrukturnya](#)

[4.2. Gerbang atmosfer \(terminal dataran tinggi\)](#)

[4.3. Wahana ulang-alik \(AstroLiner\)](#)

[5. Siklus operasi dari persiapan peluncuran hingga perawatan setelah pendaratan](#)

[5.1. Persiapan dan peluncuran](#)

[5.2. Akselerasi di dalam terowongan](#)

[5.3. Keluar melalui gerbang atmosfer](#)

[5.4. Melintasi atmosfer](#)

[5.5. Memasuki antariksa dan operasi orbital](#)

[5.6. Keluar dari orbit dan kembali](#)

[5.7. Pendaratan di laut](#)

[5.8. Penundaan dan perawatan](#)

[6. Pelaksanaan, jadwal, persyaratan, dan pusat industri](#)

[6.1. Tahapan proyek](#)

[6.2. Pusat industri](#)

[6.3. Jangka waktu keseluruhan](#)

[7. Masalah dan tugas yang ditangani](#)

[7.1. Pemanasan berlebih global](#)

[7.2. Tugas ekonomi](#)

[7.3. Tujuan strategis](#)

[7.4. Katalis teknologi](#)

[7.5. Kemandirian energi dan termal](#)

[7.6. Jejak karbon](#)

[7.7. Potensi sosial dan lingkungan Kanal Induk Hidrotermal](#)

[7.8. Jaringan energi](#)

[7.9. StarRoad sebagai urat nadi ekonomi](#)

[7.10. Keselamatan infrastruktur kritis](#)

[7.11. Pemilihan lokasi dan kemampuan untuk diperluas](#)

[7.12. Koordinasi politik dan hukum proyek lintas benua](#)

[7.13. Pertumbuhan evolusioner arus kargo](#)

[8. Pasar dan logistik orbital](#)

[8.1. Masalah permintaan untuk peluncuran kelas superberat](#)

[8.2. Pasar awal: tenaga surya antariksa dan pusat data orbital](#)

[8.3. Dasar iklim dan industri bagi tenaga surya antariksa](#)

[8.4. Lokasi orbital: GEO dan EML4/5](#)

[8.5. Tahap awal: penerbangan langsung AstroLiner-S](#)

[8.6. Tahap matang: relai gelombang mikro dan infrastruktur layanan](#)

[8.7. Pembagian angkutan menurut lingkungan operasi](#)

[8.8. Peran AstroLiner dalam logistik matang](#)

[8.9. angkutan dan kapal tunda antarorbit](#)

[8.10. Penurunan ke Bumi dan planet lain](#)

[8.11. Modul standar](#)

[8.12. Hierarki infrastruktur orbital](#)

[8.13. Galangan orbital](#)

[8.14. Permukiman orbital dan Bulan](#)

[8.15. Analogi logistik: antariksa sebagai jaringan maritim](#)

[8.16. Ekonomi arus kargo](#)

[8.17. Tahap pengembangan pasar dan logistik](#)

[8.18. Prospek evolusioner: penerus StarRoad](#)

[8.19. Potensi rekayasa planet: Tata Surya sebagai satu sistem sumber daya](#)

[8.20. Kesimpulan strategis](#)

[9. Model ekonomi proyek](#)

[9.1. Metode dan asumsi utama](#)

[9.2. Biaya penggalan dalam kondisi Afrika](#)

[9.3. Armada mesin bor terowongan buatan sendiri](#)

[9.4. Sistem energi termal panas bumi otonom](#)

[9.5. Sistem penyimpanan energi](#)

[9.6. Pusat industri dan logistik](#)

[9.7. Litbang dan purwarupa — Fase 0](#)

[9.8. Ringkasan akhir CAPEX](#)

[9.9. Pembagian per fase \(miliar USD\)](#)

[9.10. Pengembalian investasi dan perkembangan biaya angkut](#)

[9.11. Perbandingan dengan alternatif](#)

[9.12. Kesimpulan ekonomi](#)

[10. Keselamatan dan mode operasi darurat](#)

[10.1. Filosofi keselamatan: tidak ada satu kegagalan pun yang boleh berakibat fatal](#)

[10.2. Risiko utama dan perlindungannya](#)

[10.3. Jenjang protokol darurat](#)

[10.4. Langkah struktural untuk mempertahankan keselamatan](#)

[10.5. Dampak akustik dan gelombang kejut](#)

[11. Dampak budaya dan psikologis](#)

[11.1. Tontonan sebagai fenomena](#)

[11.2. Resonansi psikologis dan simbolis](#)

[11.3. Konsekuensi sosial-ekonomi](#)

[12. Kesimpulan](#)

1. Deskripsi, ciri utama, kemampuan, dan filosofi

StarRoad adalah kompleks transportasi utama jarak jauh dari Bumi ke antariksa yang dibangun di sekeliling akselerator vakum berlevitasi magnetik sepanjang lebih dari 2.050 kilometer. Sistem ini dirancang untuk mengirimkan wahana ulang-alik otonom, dapat digunakan kembali, dan superberat hingga 15.000 ton ke antariksa tanpa membawa propelan reaktif untuk peluncuran di dalam wahana.

1.1. Filosofi inti proyek

Perubahan paradigma peluncuran antariksa:

- **Melintasi atmosfer dengan inersia.** Alih-alih mengatasi atmosfer dengan gaya dorong dan efisiensi aerodinamis, StarRoad menggunakan energi kinetik yang tersimpan dalam massa wahana yang dipercepat di ruang vakum hingga kecepatan hipersonik sekitar 11 km/s. Atmosfer dilintasi sepenuhnya dengan inersia dalam 50–60 detik.
- **Massa sebagai keunggulan.** Massa besar — ribuan ton — tidak lagi menjadi musuh, melainkan pembawa energi kinetik yang sangat besar, sekaligus memungkinkan penggunaan material berkekuatan sangat tinggi dan tahan api untuk struktur serta perlindungan termal.
- **Pemisahan fungsi.** Infrastruktur energi, akselerasi, dan kendali presisi dialihkan ke kompleks darat dan menjadi sistem rekayasa stasioner. Wahana menjadi modul transportasi khusus yang dioptimalkan untuk membawa kargo, bermanuver di orbit, dan kembali.
- **Industrialisasi yang dapat ditingkatkan.** Sistem ini tidak dipandang sebagai satu fasilitas saja, melainkan sebagai jalur pertama “kereta api” antariksa, dengan kemungkinan membangun terowongan paralel, cadangan, dan tambahan sehingga kapasitas tumbuh secara eksponensial dan biaya menurun.

1.2. Kemampuan

- **Pengiriman langsung melampaui orbit geostasioner (GEO).** Kecepatan awal sekitar 11 km/s, ditambah kira-kira 0,465 km/s dari rotasi ekuatorial Bumi, memungkinkan wahana mencapai tujuan berenergi tinggi seperti titik Lagrange L1/L2 Bumi–Matahari atau Bumi–Bulan hampir secara langsung dengan koreksi minimal. Hal ini menghilangkan kebutuhan penundaan dan pengisian bahan bakar di orbit Bumi rendah.
- **Kapasitas muatan.** Ribuan ton dapat dikirimkan dalam satu penerbangan. Hal ini membuat pembangunan pembangkit orbital kelas gigawatt, permukiman antariksa, kompleks ekstraksi sumber daya, pengolahan, perakitan dan produksi, sistem pertahanan planet, serta wahana antariksa antarplanet layak secara ekonomi.
- **Biaya.** Pada pemanfaatan penuh, biaya pengiriman yang dihitung menuju orbit tinggi dapat turun hingga **US\$1–10 per kilogram** — beberapa tingkat besaran lebih rendah daripada sistem roket yang ada maupun yang direncanakan.

2. Keunggulan dan landasan teknis, ekonomi, geografis, dan strategis

2.1. Teknis

Sebagian besar konsep peluncuran orbital alternatif dibatasi bukan oleh kemungkinan pembangunan secara prinsip, melainkan oleh tuntutan operasionalnya: operasi terus-menerus, penopang dinamis aktif, keandalan yang tidak realistis tingginya, dan konsekuensi kegagalan yang dahsyat. Megastruktur kinetik aktif memerlukan pasokan daya tanpa henti dan stabilisasi dinamis terus-menerus agar tetap beroperasi; jika daya atau kendali hilang, struktur kehilangan penopang dan memasuki kondisi kegagalan yang berpotensi dahsyat. Sistem tabung vakum eksternal yang panjang juga menuntut penyegelan, isolasi bagian, dan kestabilan termal yang luar biasa ketat. StarRoad berbeda karena infrastruktur kritisnya berada di bawah tanah, memungkinkan operasi berdenyut, membatasi kecelakaan secara lokal, dan tetap stabil secara pasif. Karena itu, StarRoad menjadi bentuk minimal yang layak bagi sistem utama untuk mengangkut kargo melampaui Bumi. Penggunaan teknologi nyata — transportasi vakum, aerodinamika hipersonik, daya berdenyut, dan superkonduktor — yang disesuaikan dengan skala StarRoad semakin menjadikan pendekatan ini realistis.

2.2. Ekonomi

Biaya utamanya adalah pembangunan modal dan energi. Tidak adanya tahap sekali pakai serta konsumsi fluida kerja yang dapat diabaikan untuk peluncuran mengurangi biaya operasi secara drastis. Proyek ini juga mendorong pembangunan wilayah, sistem energi baru, dan kluster teknologi tinggi.

Penilaian kelayakan ekonomi StarRoad harus mempertimbangkan skala infrastruktur transportasi dan energi dunia. Dalam konteks arus kargo tahunan global, volume beberapa juta ton merupakan bagian yang sangat kecil, sedangkan investasi modal ratusan miliar dolar adalah hal biasa untuk infrastruktur berskala planet. Karena itu, StarRoad tidak bersaing dengan sistem transportasi yang ada; sistem ini menempati ceruk koridor berenergi tinggi yang menambah kemampuan baru dengan pengaruh relatif kecil terhadap keseluruhan arus kargo global.

2.3. Geografis

Rute dari muara Sungai Nyanga di Gabon menuju Gunung Mohi dan dataran tinggi selatan di Republik Demokratik Kongo mendekati ideal:

- **Khatulistiwa.** Tambahan kecepatan maksimum dari rotasi Bumi dan koreksi minimum terhadap inklinasi orbit.
 - **Garis pandang.** Rute yang relatif lurus melalui wilayah Afrika Tengah yang jarang penduduk.
 - **Ketinggian gerbang.** Ketinggian 3.400 meter mengurangi kepadatan atmosfer di titik keluar sebesar 30%, sehingga mengurangi beban panas dan kejut.
 - **Kestabilan seismik.** Retakan Afrika Timur menunjukkan aktivitas minimal di wilayah ini.
 - **Logistik.** Rute dimulai di laut — untuk produksi dan pengambilan kembali wahana — dan berakhir di dataran tinggi.
- **Rute dan lokasi optimal:** jalur sepanjang **sekitar 2.050 km dari muara Sungai Nyanga di Gabon ke Gunung Mohi di Republik Demokratik Kongo**. Peluncuran dari pantai Gabon menghasilkan **inklinasi orbit ekuatorial yang hampir ideal**, sekitar 3° , sehingga memberi akses langsung ke orbit geostasioner dan titik Lagrange sekaligus meminimalkan biaya transfer antarplanet. Kompleks gerbang berada di Gunung **Mohi pada ketinggian sekitar 3.400 m**, sedangkan dataran tinggi selatan yang luas disediakan untuk perluasan. Lokasi ini memiliki karakteristik sangat baik: ketinggian, medan datar, jarak lebih dari 20 km dari permukiman, serta kedekatan dengan Danau Tanganyika dan Kivu.
 - **Lokasi alternatif.** Rute **cadangan** dari Pelabuhan Kitomb di Republik Demokratik **Kongo ke Gunung Mohi akan memiliki panjang sekitar 1.850 km** dan sepenuhnya berada di dalam satu negara, sehingga menyederhanakan logistik dan koordinasi hukum. Namun, rute ini menghasilkan **inklinasi orbit** sekitar 13° , yang memerlukan **delta-v tambahan ~200–300 m/s** untuk mengirim kargo ke orbit geostasioner pada 0° atau ke titik Lagrange. Itu setara dengan **kehilangan sekitar 2–4% massa muatan** pada setiap peluncuran. Karena itu, pemilihan rute internasional yang lebih rumit tetapi **ekuatorial, dengan inklinasi sekitar 3°** , merupakan keputusan strategis untuk memaksimalkan efisiensi ekonomi sepanjang masa pakai koridor dan memberikan akses langsung ke setiap simpul penting infrastruktur orbital.

2.4. Strategis

Penciptaan koridor transportasi antariksa segala cuaca yang beroperasi sepanjang waktu. Dalam jangka panjang, jaringan jalur semacam itu menjadi infrastruktur global, perlindungan bagi peradaban dengan potensi evakuasi massal, dan landasan industrialisasi antariksa secara penuh yang memindahkan industri boros energi dan penghasil panas ke luar Bumi.

Sekalipun sistem roket mencapai biaya pengiriman muatan yang sangat rendah sebagaimana diklaim, peluncuran roket tetap merupakan peristiwa terpisah dengan kapasitas terbatas. Dalam pengertian ini, sistem roket — berapa pun harga per kilogramnya — pada dasarnya adalah logistik ekspedisi. StarRoad adalah koridor infrastruktur yang tidak hanya bertujuan meminimalkan biaya satu peluncuran, tetapi juga membentuk arus kargo yang stabil dan berkelanjutan.

3. Landasan industri dan teknologi

StarRoad tidak memerlukan penemuan hukum fisika baru, tetapi merupakan puncak integrasi rekayasa berbagai teknologi yang telah ada dan tengah berkembang:

3.1. Levitasi dan akselerasi magnetik (maglev)

Sistem ini bertumpu pada pengalaman Tiongkok, Jepang, dan Jerman. Rekor akselerasi dalam pengujian maglev Tiongkok — satu ton dari 0 hingga 700 km/jam dalam dua detik — menunjukkan kelayakan mendasar untuk mempercepat benda bermassa besar secara cepat.

3.2. Teknologi superkonduktor dan arsitektur terdistribusi

StarRoad menggunakan arsitektur terbalik: magnet superkonduktor yang menghasilkan medan utama untuk levitasi dan stabilisasi dibawa di dalam wahana dan didinginkan oleh sistem kriogeniknya. Terowongan berisi lilitan “rel” tembaga atau aluminium yang relatif sederhana dan murah, yang berfungsi sebagai pemandu pasif sekaligus rangkaian sekunder untuk menyalurkan energi akselerasi berdenyut. Pendekatan ini menurunkan biaya dan kerumitan terowongan beberapa tingkat besaran, dengan memindahkan kerumitan teknologi utama ke wahana yang dapat digunakan kembali dan dapat dirawat secara terpusat.

3.3. Daya pulsa

Stasiun superkapasitor dan baterai yang tersebar di sepanjang rute diisi oleh jaringan SOTEG dan memasok denyut daya skala gigawatt ke segmen akselerator yang diperlukan.

3.4. Teknologi vakum

Pengalaman dari Large Hadron Collider di CERN, SpinLaunch, dan tabung vakum Hyperloop.

3.5. Aerodinamika hipersonik dan perlindungan termal

Pengetahuan yang diperoleh dari wahana antariksa, wahana masuk kembali yang dapat bermanuver, dan proyek seperti SpaceX Starship. Pendinginan aktif dan penyimpanan panas perubahan fase.

3.6. Sistem tenaga nuklir

Reaktor kompak di dalam wahana — satu generasi melampaui generator termoelektrik radioisotop — atau modul fusi masa depan seperti sistem Helion Energy untuk memasok tenaga bagi wahana di orbit.

3.7. Pembangunan terowongan

Mesin bor terowongan modern yang mampu maju puluhan kilometer per tahun, dengan beberapa terowongan digali secara paralel.

3.8. Sistem energi termal panas bumi otonom

Proyek mencakup infrastruktur energi dan iklim terpadu skala gigawatt berdasarkan teknologi Enhanced Geothermal Systems (EGS) yang dimodifikasi. Fluida kerjanya karbon dioksida superkritis (sCO₂) dari penangkapan langsung udara (DAC). Sistem memiliki tiga fungsi penting: 1) mengendalikan medan panas geotermal agar suhu terowongan stabil; 2) menghasilkan listrik beban dasar; 3) menghilangkan CO₂ atmosfer dalam jangka panjang.

3.9. Pembakaran supersonik

Penghalang gasdinamis pada gerbang menggunakan mesin jet supersonik berbentuk cincin yang beroperasi dengan campuran udara–hidrogen. Pembakaran supersonik membentuk aliran gas kerucut yang stabil dan diarahkan keluar sepanjang sumbu terowongan. Aliran ini menyingkirkan udara atmosfer dan menciptakan gradien tekanan yang melindungi kevakuman akselerator ketika wahana melintas.

3.10. Siklus bahan bakar tertutup untuk portal

Penghalang gas-dinamis menggunakan bahan bakar bersih dan terbarukan. Elektrolisis menghasilkan hidrogen dari air; mesin memakai udara atmosfer sebagai pengoksidasi. Setelah penghalang dinyalakan, hasil utama pembakaran adalah uap air superpanas. Cara ini meniadakan kebutuhan untuk mengirim dan menyimpan bahan bakar kimia dalam jumlah besar di lokasi pegunungan terpencil, sehingga keandalan meningkat dan biaya operasi turun.

3.11. Strategi validasi teknologi

Pengembangan proyek berlangsung melalui dua jalur paralel: pemodelan matematis dan pengujian skala penuh terhadap rakitan penting. Hal ini memberikan konfirmasi dini atas kelayakan konsep dan data rekayasa yang tepat sekaligus meminimalkan risiko bagi proyek utama.

4. Uraian rinci bertahap mengenai elemen dan teknologi StarRoad

4.1. Terowongan akselerasi dan infrastrukturnya

- **Panjang:** sekitar 2.050 km.
- **Penampang.** Berbentuk elipsoid ($\sim 17,5 \times 12,5$ m), dioptimalkan untuk bentuk aerodinamis wahana dan levitasi magnetik yang stabil.
- **Kedalaman terowongan:** hingga sekitar 8 km, atau lebih dalam jika kondisi geologi dan suhu memungkinkan. Kedalaman yang layak hanya dapat ditetapkan setelah penyelidikan geologi terperinci: pengeboran sepanjang jalur, profil suhu, tegangan dan rekahan batuan, serta hidrogeologi. Semakin rendah suhu dan aliran panas lapisan dalam — sebagai acuan hingga sekitar 200–250 °C — semakin luas rentang kedalaman yang dapat direkayasa dan semakin bebas radius tikungan serta bagian peralihan dapat dioptimalkan. Dengan demikian, beban dinamis dan puncak percepatan dapat dikurangi tanpa mengorbankan kecepatan sasaran.
- **Konstruksi:** gabungan. Bagian awal sepanjang sekitar 330 km berupa jalur lurus bawah tanah dengan kemiringan landai yang turun langsung menuju gerbang untuk mempermudah percepatan. Bagian utama berada jauh di bawah tanah demi kestabilan suhu, isolasi vakum, dan keselamatan.
- **Geometri jalur: lengkung** berbentuk S setelah sekitar 330 km.
 - **Lengkung menurun:** radius sekitar 6.300 km; membawa terowongan turun secara bertahap untuk membentuk sudut yang diperlukan.
 - **Lengkung menaik:** radius 2.500–3.500 km; membawa terowongan ke gerbang pada sudut sekitar 5–6° terhadap bidang mendatar. Radius dihitung agar percepatan sentripetal tidak melebihi 4 g pada kecepatan hipersonik.
- **Sistem vakum: bersegmen.** Setiap segmen sekitar 50 km berdiri sendiri dengan pompa vakum, sensor, dan katup daruratnya sendiri.

4.1.1. Sistem percepatan

Percepatan dan stabilisasi wahana dihasilkan oleh interaksi magnet superkonduktor di wahana dengan penggerak elektromagnetik linear yang tersebar di terowongan. Penggerak ini berupa kumparan pasif bersegmen dari konduktor biasa — tembaga atau aluminium — yang tidak memerlukan pendinginan kriogenik.

- **Di bagian awal, 0–330 km:** penggerak terutama **berada di bawah lintasan**. Medan yang dihasilkan menopang levitasi, percepatan awal 4 g, dan kompensasi aktif terhadap gravitasi.
- **Di bagian tengah, 330–2.000 km, terutama pada lengkung S :** penggerak mengelilingi terowongan. Sistem memberi percepatan presisi, menahan wahana tetap di tengah pada kecepatan hipersonik, dan menstabilkan arah di tikungan. Pada lantai bagian akhir yang mengalami percepatan radial tinggi digunakan kumparan yang diperkuat dan dibuat berlebih secara struktural. Dari kilometer 330 hingga 2.000, percepatan turun mengikuti kurva dari 4 g menjadi 0 g, sementara kecepatan mencapai sekitar 11 km/detik.
- **Di bagian terakhir, 2.000–2.050 km:** 50 km terakhir digunakan untuk menstabilkan dan memusatkan wahana sebelum memasuki atmosfer melalui gerbang atmosfer. Tidak ada percepatan pada bagian ini.

Energi pulsa dari gardu sistem geotermal mandiri disalurkan ke segmen kumparan tertentu dengan sinkronisasi tepat terhadap posisi **wahana. Medan magnet berjalan** yang terbentuk berinteraksi dengan magnet wahana dan mempercepatnya. Arsitektur ini menyederhanakan terowongan, memudahkan perawatan, dan menempatkan komponen berteknologi tinggi pada wahana yang dapat digunakan kembali.

4.1.2. Sistem energi termal panas bumi otonom

Untuk menjamin kestabilan suhu, kemandirian energi, dan umur panjang, setiap terowongan akselerasi disertai tujuh terowongan layanan kecil yang membentuk sistem energi termal geotermal mandiri, selanjutnya «sistem geotermal mandiri»:

- **Enam terowongan kolektor-energi utama berdiameter 2 m.** Letaknya 30 m di bawah lantai akselerator dengan jarak sumbu 7 m. Terowongan bekerja berpasangan dengan sirkulasi balik sCO₂ yang didinginkan kuat hingga +5 °C, membentuk lempeng batuan dingin kontinu setebal lebih dari 15 m tanpa jembatan panas.

- **Satu terowongan layanan teknis berdiameter 3 m**, sejajar dengan akselerator pada jarak samping 3 m, memberi akses diagnosis dan perbaikan tanpa menghentikan operasi. Terowongan dirancang menahan tekanan dalam hingga 25 MPa, tekanan batuan, dan beban **dinamis**. **Armada mikromesin bor terowongan robotik menggali ketujuhnya**. **Sistem memisahkan infrastruktur** energi dan angkutan secara fisik maupun fungsional untuk keandalan serta kemudahan perawatan tinggi.

4.1.3. Sistem pendingin SOTEG

- **Sirkuit pendinginan** dalam. Kolektor di bawah akselerator mengalirkan fluida CO₂ bertekanan tinggi dalam keadaan rapat atau superkritis. Dalam mode suhu rendah normal, aliran dingin memasuki kolektor pada sekitar +5...+15 °C. Setelah menyerap panas bumi, CO₂ dapat melebihi +100 °C bergantung pada kedalaman, aliran panas batuan, dan mode pembangkitan. Sirkuit membuang panas, membentuk zona dingin di bawah terowongan, dan memungkinkan konstruksi aman pada kedalaman sekitar 5–8 km.

- **Kanal utama hidrotermal** . Kanal dibangun sejajar dengan jalur StarRoad, jalan layanan, saluran listrik, dan komunikasi untuk menyatukan terminal dalam sistem pembuangan panas permukaan.

Kanal selebar sekitar 5–8 m dan sedalam 2–3 m. Beberapa pipa berkelok mandiri bertekanan tinggi di dasarnya membawa CO₂ antarterminal. Air menjadi penyangga panas dan media perpindahan panas antara.

Setelah turbin, penukar, atau kompresor, CO₂ masuk pipa pada sekitar +50...+80 °C. Sepanjang sekitar 50 km, panas berpindah ke air dan CO₂ mendingin ke +22...+35 °C, bergantung musim, kelembapan, hujan, pendinginan radiasi malam, dan mode kanal.

Dalam operasi normal, air kanal berada pada +22...+32 °C dan dapat naik setempat ke +35...+45 °C. Dekat masuknya aliran panas, suhu sesaat dapat +50...+80 °C dan menekan aktivitas biologis, tetapi air tetap tidak layak minum tanpa pengolahan.

Penutup selektif ringan memantulkan sinar matahari sambil memungkinkan pelepasan panas inframerah.

- **Pendinginan terminal**. Setiap terminal memiliki menara pendingin, penukar panas, pompa, kompresor penguat, turboekspander, dan chiller cadangan. Biasanya sebagian besar panas rendah dibuang pasif melalui kanal.

Menara dan penukar terminal menurunkan CO₂ dari +22...+35 °C menjadi +15...+25 °C. Bila perlu, chiller cadangan menurunkannya ke –5...+5 °C sebelum kolektor. Chiller hanya untuk puncak, darurat, atau musim tertentu.

- **Kompresi penguat dan turboekspansi**. CO₂ dingin tiba di terminal berikut pada tekanan tinggi, lalu dapat melewati turboekspander untuk memulihkan sebagian energi kompresi dan mendingin melalui ekspansi hingga sekitar –10...+5 °C sesuai tekanan, laju alir, dan fase yang dibutuhkan.

CO₂ kemudian masuk kolektor pada suhu, tekanan, dan fase yang diperlukan. Siklus ini bukan energi gratis: kompresor memberi kerja, kanal membuang panas kompresi, dan turboekspander hanya memulihkan sebagian energi. Hasilnya ialah aliran lebih dingin dengan beban pendinginan aktif lebih kecil.

- **Redundansi dan aliran dua arah**. Pipa berkelok dibuat ganda dan dapat dibalik. Jika satu sirkuit rusak, aliran dialihkan melalui pipa cadangan atau terminal tetangga. Arah CO₂ berubah menurut beban panas, keadaan darurat, dan ketersediaan bagian.

- **Kemudahan perawatan**. Pintu air membagi kanal kira-kira setiap kilometer. Bagian rusak diisolasi dan dipompa hingga muka air teknis minimum atau dikeringkan sebagian. Setelah tekanan dilepas, tim atau robot mengakses pipa tanpa menghentikan seluruh jalur. Sirkuit cadangan, pembalikan aliran, pertukaran terminal tetangga, dan chiller sementara mempertahankan pendinginan.

- **Fungsi air terbatas**. Sebagai fungsi sekunder, kemiringan tetap dari timur ke barat memungkinkan aliran gravitasi lambat, pembilasan, dan pelepasan kelebihan air terkendali.

Hujan ekuatorial malam dapat mengisi kanal melalui daerah tangkapan, kolam pengendap, filter, dan pelimpah. Karena air tidak menyentuh CO₂, setelah pengolahan lokal air dapat dipakai terbatas untuk irigasi, kebutuhan teknis terminal, cadangan kebakaran, dan sabuk hijau.

Fungsi ini tetap sekunder: pengambilan air hanya diizinkan jika tidak mengganggu tugas utama kanal, yaitu mendinginkan CO₂ dan menjaga kestabilan termal sistem geotermal mandiri.

- **Arti bagi StarRoad.** Kolektor dalam, kanal, pendingin terminal, menara, kompresor penguat, turboekspander, dan chiller cadangan membentuk satu sistem pengelolaan panas tersebar. Sistem mengurangi ketergantungan pada mesin lokal, meningkatkan toleransi kegagalan, memindahkan aliran panas antarterminal, dan membuat pembangunan akselerator dalam lebih realistis.

Pendinginan permukaan juga memperkuat peran ekonomi StarRoad: sepanjang jalur tumbuh koridor terminal, jalan layanan, simpul energi, kanal, kawasan industri, dan lahan pertanian beririgasi.

4.1.4. Arti strategis SOTEG

Selain energi dan kestabilan suhu, sistem memungkinkan terowongan utama dibangun aman dan ekonomis pada kedalaman 5–8 km atau lebih. Kendali medan panas dan pengambilan panas bumi meniadakan batas suhu yang sebelumnya menghalangi. Geometri S beradius besar pun dapat dibuat agar wahana menanjak bertahap dan keluar pada sudut sekitar 5–6°, sementara beban kargo serta awak tetap sekitar 4 g sepanjang 2.050 km. Sistem geotermal mandiri menjadi dasar teknologi energi sekaligus optimasi balistik StarRoad. Seluruh kompleks digali armada mikromesin bor robotik.

4.1.5. Sistem terowongan teknis samping yang tegak lurus

Untuk mendukung pembangunan, ventilasi, perbaikan, dan evakuasi, 40 terowongan angkut miring dibangun di sepanjang rute dengan jarak 50 km. Masing-masing memiliki kemiringan 30° dan penampang elipsoid sekitar 17,5 × 12,5 m. Terowongan itu digali oleh mesin bor yang sama dengan terowongan utama dan menghubungkan permukaan ke koridor utama pada kedalaman hingga 8 km.

- **Logistik:** menyediakan jalur evakuasi mandiri bagi personel dan awak saat penghentian darurat Alarm-2. Berbeda dari poros vertikal, terowongan miring memungkinkan kendaraan membawa puluhan orang dalam sekali jalan.
- **Keselamatan:** menyediakan jalur evakuasi mandiri kedua bagi personel dan awak saat Alarm-2.
- **Skalabilitas:** terowongan miring menjadi dasar sambungan jalur StarRoad sejajar di masa depan. Cabang mendatar dapat digali menuju akselerator baru sehingga jaringan akses terus berkembang.
- **Integrasi sistem** geotermal mandiri. Kolektor digali 10–20 m di bawah setiap terowongan miring untuk membekukan awal dan menstabilkan batuan saat pembangunan, lalu menghasilkan energi.
- **Kompleks terminal permukaan.** Setiap terowongan miring berakhir di terminal multifungsi. Masing-masing dari 40 terminal merupakan simpul mandiri yang memuat:
 - **ventilasi dan pembersihan** gas untuk menjaga kondisi udara dan membuang udara bekas;
 - **pangkalan konstruksi** dengan area penyimpanan, pemindahan, dan penampungan sementara modul, tanah galian, dan bahan;
 - **gedung operasi dan hunian** untuk petugas sif, berisi ruang kendali, ruang istirahat, bengkel, dan gudang;
 - **pembangkit geotermal dan instalasi pendingin** yang terhubung ke sistem geotermal mandiri untuk memakai dan mengendalikan fluida kolektor dalam;
 - **stasiun penangkapan dan pengolahan CO₂** dengan penangkapan langsung udara (DAC), yang menutup siklus: CO₂ dicairkan, dimurnikan, lalu dikirim sebagai fluida termal ke kolektor;
 - **sambungan ke jaringan listrik dan komunikasi luar** untuk daya cadangan dan hubungan pita lebar.
 - **jalan akses atau cabang rel** ke jaringan wilayah;
 - **titik evakuasi permukaan** dengan pos medis darurat dan helipad.
- **Keluwesannya hukum dan lingkungan.** Terowongan servis miring memungkinkan terminal permukaan ditempatkan di luar lahan lindung—taman nasional, cagar alam, dan daerah tangkapan air—meskipun StarRoad melintas jauh di bawahnya. Dengan demikian, rute dapat melewati bawah kawasan konservasi tanpa membangun infrastruktur di dalam batas taman, sehingga hambatan hukum utamanya hilang. Setiap terminal dibangun di lokasi tak terlindungi terdekat dan dihubungkan melalui poros miring; perizinan lebih sederhana, tekanan lingkungan berkurang, dan dampak langsung pada ekosistem lindung ditiadakan.

4.1.6. Pasokan dan penyimpanan energi

Pasokan akselerator dibangun sebagai jaringan tiga tingkat yang menjamin:

- redundansi: kegagalan satu unsur tidak menghentikan sistem;
- kecepatan pelepasan adaptif: dari detik di awal hingga mikrodetik di akhir;
- kabel daya sesingkat mungkin untuk mengurangi rugi dan induktansi.

○ **Tingkat topologi**

Tingkat 0: penyimpan utama di terminal

- Ke-40 terminal memiliki penyimpan gravitasi, pembangkit pompa hidro — mikrohidro di kanal — dan baterai ion litium (BESS).
- Kapasitas setiap terminal: sekitar 5–9 GWh; total jalur sekitar 360 GWh.
- Keluaran: arus searah tegangan tinggi hingga 100 kV melalui kabel utama di terowongan teknis.

Tingkat 1: pengendali segmen 50 km

- Jalur dibagi menjadi 41 segmen 50 km; segmen terakhir ialah 50 km menuju gerbang.
- Setiap segmen memiliki pengendali distribusi utama yang menerima energi dari dua terminal tetangga untuk redundansi silang.
- Pengendali membagi energi ke blok 1 km dan menyinkronkan operasinya.

Tingkat 2: blok daya sepanjang satu kilometer. Setiap blok memiliki pengendali lokal yang:

- menerima energi dari pengendali segmen;
- mengendalikan baterai ion litium penyangga di bawah dinding terowongan utama;
- mengendalikan set kumparan alih melalui roda gila dan superkapasitor di ceruk belakang dinding.

Dua saluran mandiri dari pengendali segmen ke setiap blok memberi redundansi.

○ **Arsitektur kabel**

- **Kabel utama tingkat 0→1** dipasang dalam terowongan teknis 3 m yang sejajar 3 m dari terowongan utama.
- **Distribusi jalur:** kabel dari setiap terminal membentang 50 km ke dua arah, total 100 km, dan bertumpang tindih dengan terminal tetangga. Setiap segmen dipasok sedikitnya dua terminal untuk redundansi 100%.
- **Masuk ke terowongan** utama: setiap 1 km, kabel melewati tembusan bersegel dari terowongan teknis dan terhubung ke pengendali blok.
- **Distribusi dalam blok:** setelah pengendali, daya terbagi menjadi dua jalur:

jalur A: baterai ion litium penyangga sekitar 0,5–1 GWh per blok untuk meratakan puncak berdurasi detik;

jalur B: set kumparan alih melalui roda gila dan superkapasitor di belakang dinding.

- **Penyesuaian laju pelepasan dalam tiga zona.** Profil akselerasi wahana dioptimalkan agar daya puncak per rangkaian lilitan paling tinggi pada awal lintasan, ketika denyut ultrasingkat tidak diperlukan, dan menurun menuju ujung rute. Hal ini memungkinkan penggunaan teknologi penyimpanan dan pensakelaran yang berbeda di ketiga zona:

Zona	Bagian jalur	Sifat pelepasan	Penyimpan / sakelar	Alasan
Zona I — kecepatan rendah	0–200 km	Detik hingga milidetik	Baterai ion litium dan inverter IGBT biasa	Wahana masih lambat dan menempuh satu kilometer dalam >0,1 detik. BESS dapat memasok tanpa penyangga tambahan.
Zona II — kecepatan sedang	200–1.000 km	Milidetik hingga mikrodetik	Baterai penyangga, roda gila, dan inverter SiC	Wahana makin cepat; sakelar harus lebih cepat, tetapi roda gila mekanis masih dapat digunakan.
Zona III — kecepatan tinggi	1.000–2.000 km	Pulsa mikrodetik	Superkapasitor dan sakelar tiristor cepat GTO/IGCT	Waktu per kilometer turun ke 0,09 detik. Hanya superkapasitor berrespons nanodetik yang dapat menstabilkan pulsa.

Penting: energi per kilometer di Zona III lebih kecil daripada Zona I karena percepatan menurun. Beban komponen turun walau pelepasan harus lebih cepat.

○ **Redundansi dan ketahanan darurat**

- **Pengendali ganda:** setiap pengendali segmen dan blok memiliki cadangan panas berupa dua papan identik dengan daya mandiri.

- **Pasokan silang:** setiap blok dapat menerima energi dari pengendalinya dan pengendali tetangga melalui kabel cadangan.
- **Redundansi kumparan lokal:** setiap blok punya tiga set mandiri yang bergantian. Jika satu rusak, dua lainnya terus bekerja dengan efisiensi lebih rendah tanpa berhenti.
- **Pemutusan darurat:** bila ada hubung singkat atau panas berlebih, pengendali memutus blok dan mengisolasinya dengan gerbang antarbagian tanpa memengaruhi blok tetangga.

○ Pelaksanaan material dan kesimpulan

Unsur	Lokasi	Fungsi
Penyimpan utama	Di permukaan, pada terminal	Penyimpanan energi jangka panjang, 360 GWh.
Kabel utama	Terowongan teknis 3 m	Penyaluran energi secara redundan dari terminal ke segmen.
Pengendali segmen	Ceruk terowongan utama setiap 50 km	Pembagian energi ke 10 blok kilometer dan sinkronisasi.
Baterai ion litium penyangga	Di bawah dinding terowongan utama	Meratakan puncak berdurasi detik di Zona I–II.
Roda gila	Di belakang dinding, Zona II	Penyangga pulsa milidetik.
Superkapasitor	Di belakang dinding, Zona III	Stabilisasi mikrodetik dan kompensasi penurunan.
Pengendali lokal per kilometer	Di ceruk setiap 1 km	Kendali sakelar kumparan, pemantauan keadaan, dan pengelolaan penyangga.
Kumparan akselerator	Permukaan dalam terowongan	Membentuk medan magnet berjalan untuk mempercepat wahana.

○ Keunggulan arsitektur energi

- **Pembagian beban bertahap.** Daya puncak tidak dibutuhkan serentak di seluruh terowongan: pulsa lambat di awal, singkat tetapi lebih kecil di akhir.
- Redundansi semua tingkat. Kegagalan terminal, pengendali, atau segmen 50 km tidak menghentikan sistem; tetangganya mengganti energi yang hilang.
- **Pengembangan luwes.** Jalur StarRoad sejajar hanya memerlukan kabel utama tambahan di terowongan teknis yang ada.
- **Optimasi biaya.** Superkapasitor dan roda gila mahal hanya dipakai di bagian akhir; bagian awal memakai baterai ion litium lebih murah.

4.2. Gerbang atmosfer (terminal dataran tinggi)

Mengatasi masalah «mil terakhir».

4.2.1. Lokasi dan konstruksi

Kompleks gerbang berada di dataran tinggi puncak Gunung Mohi, sekitar 3.400 m di atas permukaan laut, di Republik Demokratik Kongo. Dataran tinggi yang luas 16 km di sebelah selatan dicadangkan bagi pengembangan puluhan gerbang sejajar. Bangunan masif ini memuat penutup mekanis utama dan sistem pembentuk penghalang gasdinamik. Secara fisik, bentuknya menyerupai mesin jet darat tetap dengan tiga nosel cincin yang diarahkan miring ke langit — bukan untuk mempercepat benda, melainkan untuk menyingkirkan udara atmosfer dan membentuk penyangga ketika wahana memasukinya.

4.2.2. Penghalang gasdinamik

Komponen kerja utama. Beberapa detik sebelum wahana tiba, sistem membentuk aliran gas supersonik berbentuk kerucut yang diarahkan keluar sepanjang sumbu terowongan.

- **Sumber dan susunan:** tiga mesin jet cincin yang konsentris dan saling mandiri, atau ramjet hipersonik setara dengan tiga sabuk, mengelilingi mulut gerbang dan membakar campuran udara-hidrogen. Hidrogen dibuat di lokasi melalui elektrolisis. Dua sabuk mana pun cukup untuk membentuk penghalang yang efektif, sehingga sistem tetap bekerja bila sabuk ketiga gagal. Setiap sabuk memiliki pasokan bahan bakar, kendali, dan penyalaan sendiri. Sabuk tersusun

bertingkat di bagian luar gerbang, dari yang kecil hingga yang besar semakin mundur. Penutup mekanis berada di dalam gerbang di belakang rangkaian ini, sehingga sabuk dapat dinyalakan sebelum penutup dibuka.

- **Fungsi utama :**

1) menghasilkan tekanan ke arah luar untuk melindungi vakum terowongan saat wahana melintas;

2) menyingkirkan dan memanaskan udara di depan pintu keluar untuk membentuk gradien antara vakum terowongan dan atmosfer, sehingga terjadi peralihan bertahap antara kedua medium.

Penghalang gasdinamik bukan pelindung aerodinamis wahana dan tidak mengisolasinya dari atmosfer. Fungsinya memperpanjang waktu peralihan medium: beban kejut yang hampir seketika dalam skala mikrodetik saat menyentuh udara dingin dan diam diubah menjadi beban yang tersebar selama milidetik ketika wahana memasuki aliran panas yang searah. Gaya aerodinamis total tidak berkurang, tetapi sentakan dan komponen frekuensi tingginya turun tajam sehingga risiko kerusakan lokal dan kejut termal berkurang.

- **Bentuk aliran:** kerucut berpenampang elips yang mengikuti terowongan dan wahana, panjangnya puluhan hingga ratusan meter, dan mengarah keluar dari tiga baris nosel cincin gerbang.

Penghalang tidak perlu membentuk kerucut yang sempurna secara geometris, tetap, atau benar-benar simetris terhadap sumbu. Cara kerjanya memang dinamis dan memungkinkan perubahan bentuk, kerapatan, serta kecepatan terhadap ruang dan waktu.

Satu-satunya syarat mutlak ialah mempertahankan gradien tekanan dan momentum positif ke arah luar sepanjang keluarnya wahana, sehingga udara atmosfer sama sekali tidak masuk ke terowongan. Penyiapan gasdinamik dan termal di area keluar sebelumnya sangat meningkatkan keandalan dan kelayakan sistem.

Karena itu, bentuk aliran merupakan parameter adaptif, bukan sasaran tetap. Sistem mengoptimalkannya secara waktu nyata berdasarkan besaran terpadu — tekanan, laju aliran massa, dan momentum — bukan geometri yang ditentukan secara kaku.

- **Skalabilitas dan pengujian:** tidak seperti akselerator ribuan kilometer, gerbang bersifat modular dan mudah diskalakan. Teknologi kunci — kerucut gasdinamik supersonik yang stabil, sinkronisasi, dan pengoperasian sabuk jet — dapat diuji sepenuhnya pada perangkat uji fungsional skala 1:5 atau 1:10. Risiko teknis utama dapat diselesaikan sebelum pembangunan jalur ukuran penuh.

4.2.3. Sistem keselamatan

Penggunaan hidrogen menuntut perlindungan yang lebih ketat terhadap kebakaran dan ledakan. Infrastruktur mencakup deteksi kebocoran berlapis, pembilasan pipa secara inert dengan nitrogen, peralatan tahan ledakan, pemisahan fisik antara elektroliser, penyimpanan, dan sabuk penggerak, serta saluran ventilasi terarah untuk melepas kebocoran jauh dari personel dan fasilitas penting.

4.3. Wahana ulang-alik (AstroLiner)

4.3.1. Dimensi dan massa peluncuran

Panjang sekitar 150 m dengan penampang elipsoid sekitar 10×15 m. Bentuknya berupa baji hipersonik yang dioptimalkan untuk mengurangi hambatan dan beban panas saat menembus atmosfer.

- **Massa peluncuran optimal: sekitar 15.000 ton.**

Massa 15.000 ton merupakan hasil pencarian titik optimum teknik-ekonomi di antara batas fisik dan kemampuan pelaksanaan.

Kriteria	Batas bawah (< 8.000–10.000 t)	Optimum (15.000 t)	Batas atas (> 20.000–25.000 t)
Aerodinamika dan percepatan	Atmosfer mendominasi. Hambatan $F_d = \rho \cdot A \cdot v^2$ menghasilkan percepatan besar $a = F_d/m$, memerlukan stabilisasi aktif yang rumit, dan menimbulkan puncak beban panas.	Inersia mendominasi. Hambatan atmosfer menghasilkan percepatan awal singkat — hingga 5 detik pada sekitar 3–6 g — sehingga sistem peredam dan pelindung panas yang lebih sederhana dapat digunakan.	Percepatan hanya sedikit berkurang, sedangkan faktor lain meniadakan manfaatnya.

Kriteria	Batas bawah (< 8.000–10.000 t)	Optimum (15.000 t)	Batas atas (> 20.000–25.000 t)
Kondisi termal	Kapasitas panas rendah. Massa kecil m cepat memanaskan menurut $\Delta T = Q \cdot t / (m \cdot c)$ dan menuntut pendinginan aktif yang ekstrem.	Inersia termal tinggi. Struktur masif menyerap dan menyebarkan puncak panas selama penembusan atmosfer yang singkat, sehingga perlindungan pasif dan aktif dapat digabungkan.	Kapasitas panas meningkat, tetapi membuang panas dari struktur yang sangat masif menjadi masalah tersendiri.
Energi peluncuran	Energi yang diperlukan, $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$, masih wajar tetapi tidak menutupi kekurangan lain.	Keseimbangan yang masuk akal. Percepatan hingga 11 km/detik membutuhkan sekitar 9×10^{14} J atau 252 GWh, sesuai kemampuan sistem geotermal mandiri yang tersebar beserta penyimpanannya.	Kebutuhan energi tumbuh linear dan menuntut kenaikan daya serta kapasitas penyimpanan yang tidak sebanding, sehingga tidak ekonomis.
Konstruksi dan logistik	Dapat diwujudkan, tetapi tidak memberi keuntungan utama «pendobrak inersial».	Sesuai dengan teknologi yang ada. Dimensi dan massa berada dalam kemampuan galangan kapal, pengelasan industri, dan angkutan berat masa kini.	Struktur kehilangan kekakuan; muncul masalah modus getaran alami, perakitan, dan pengiriman ke lokasi awal. Biaya tumbuh lebih cepat daripada massa.
Filosofi StarRoad	Tetap berada dalam paradigma «wahana ringan» yang rentan terhadap atmosfer.	Menerapkan paradigma «pendobrak inersial»: atmosfer bukan lagi penghalang, melainkan gangguan singkat yang diatasi dengan massa dan kekuatan struktur.	Menjadi pekerjaan di luar kemampuan industri dan meniadakan skala ekonomi.

- **Secara fisik:** berada di atas ambang sekitar 10.000 t, ketika inersia mulai mengungguli pengaruh aerodinamis.
- **Secara energi:** tidak menyebabkan pertumbuhan eksponensial kebutuhan infrastruktur.
- **Secara teknologi:** tetap berada dalam praktik industri yang dapat diskalakan, seperti pembuatan kapal dan mesin berat.
- **Secara ekonomi:** menyeimbangkan penurunan biaya pengiriman ke orbit karena skala dengan pembatasan investasi awal.

Massa ini merupakan optimum **terhitung yang menjadikan StarRoad layak secara fisik dan dapat dipertanggungjawabkan secara ekonomi.**

4.3.2. Tata letak dan sistem

Seluruh arsitektur dalam dirancang sebagai struktur memanjang bertingkat, dengan fungsi dipisahkan menurut ketinggian badan wahana.

- **Bagian bawah dan belakang** sepenuhnya digunakan untuk energi dan penggerak: reaktor wahana, penukar panas, sirkuit pendinginan aktif, pengubah daya, penyimpanan energi, pipa fluida termal, dan penggerak laut. Penempatan ini menurunkan pusat massa, meningkatkan kestabilan dalam penerbangan hipersonik, meluncur, dan pendaratan di air, sekaligus menyederhanakan perlindungan panas dan radiasi kompartemen atas.
- **Sistem superkonduktor untuk levitasi** dan stabilisasi dipasang di sepanjang sisi dan sebagian dasar wahana. Modulnya tepat di balik kulit luar dan pelindung panas agar celah ke kumparan pasif terowongan sekecil mungkin. Magnet ditempatkan:
 - di sepanjang kedua sisi badan, termasuk zona atas dan tengah sampai garis pintu geser;
 - di bagian tengah dan belakang dasar;
 - kecuali pada jalur keluarnya sayap utama dan ceruk mekanis.

Penyebaran ini menghasilkan medan yang merata, kestabilan tinggi pada kecepatan hipersonik, dan ketahanan terhadap kerusakan lokal.
- **Bagian tengah** memuat ceruk sayap lipat dan rangka penopangnya. Sayap utama masuk ke badan dan terpisah dari kompartemen energi serta kargo. Bagian depan zona tengah memuat sayap kendali kecil yang dapat ditarik untuk koreksi dan stabilisasi lintasan dalam keadaan peralihan.

- **Bagian atas memuat** modul muatan universal yang dapat diganti. Dimensi, titik pengikat, massa, dan rentang pusat gravitasinya dibakukan; modul dapat diatur untuk kargo, tanker, penumpang, atau gabungan. Modul dipasang dan dikeluarkan di dok sebelum peluncuran, dan juga dapat ditangani di orbit setelah pintu atas terbuka. Pengangkat hidrolik atau elektromekanis terpadu dan rel pemandu memungkinkan modul dikeluarkan secara otomatis dalam mikrogravitasi tanpa awak.
- **Pintu geser atas** bukan bagian rangka pemikul beban; fungsinya sebagai selubung aerodinamis dan akses orbital. Panel radiator lipat terintegrasi di dalamnya. Setelah pintu terbuka penuh dan terkunci, panel terbentang otomatis lalu dialiri refrigeran untuk memancarkan kelebihan panas ke ruang hampa.
- **Bagian depan wahana** memiliki susunan fungsi bertingkat:
 - zona atas: anjungan, kendali, navigasi, dan komunikasi;
 - zona tengah: mekanisme sayap kecil yang dapat ditarik dan permukaan kendali;
 - zona bawah: tangki kriogenik bahan bakar dan refrigeran, disusun untuk menekan hambatan hidrolik dan memasok pendingin secepat mungkin ke sistem aktif di hidung selama penembusan atmosfer.

Susunan ini memendekkan sirkuit termal dan hidrolik, mengurangi inersia panas hidung, dan meningkatkan keandalan pelindung pada fase terberat. Secara keseluruhan, wahana memiliki arsitektur kaku, modular, dan dapat diskalakan untuk peluncuran hipersonik, operasi orbital, pelayaran mandiri, dan penggunaan berulang tanpa pembongkaran besar badan.

4.3.3. Pelindung panas badan

Hidung dan dasar dilengkapi pelindung panas berlapis dari logam dan komposit untuk menghadapi beban termal serta dinamis ekstrem saat penerbangan hipersonik dan pendaratan di air. Sistem menggabungkan unsur pasif dan aktif:

- lapisan luar tahan panas yang sanggup menahan suhu ribuan derajat dalam waktu singkat dan pemanasan radiasi yang kuat;
- sublapisan logam struktural yang menerima beban mekanis dan getaran;
- sirkuit pendinginan aktif yang membuang panas dari bagian paling terbebani, terutama hidung dan tepi depan dasar;
- unsur ablatif yang dapat diganti di titik kritis, dirancang aus secara terkendali tanpa merusak struktur utama.

Pelindung memperhitungkan kejutan termal ketika badan panas menyentuh air saat pendaratan, termasuk gradien suhu mendadak dan tegangan termal berulang. Unsur yang paling terbebani dibuat bersegmen dan dapat diganti secara modular saat perawatan, sehingga kemudahan perbaikan dan usia pakai berulang meningkat.

4.3.4. Sayap

Wahana memiliki dua pasang sayap yang dapat ditarik untuk stabilisasi, meluncur, dan mendarat di air. Sayap dibuka setelah mencapai lapisan atmosfer yang renggang.

- **Pasangan depan** mengoreksi lintasan, menstabilkan angguk dan guling, serta meredam gangguan dinamis. Sayap ini dibuka di atmosfer renggang untuk meluncur.

Parameter setiap sayap depan:

- panjang dari pangkal: sekitar 35 m;
- lebar pangkal / ujung: sekitar 14 / 7 m;
- luas: sekitar 360–400 m².

- **Pasangan belakang** merupakan permukaan aerodinamis utama wahana.

Parameter setiap sayap belakang:

- panjang dari pangkal: sekitar 100 m;
- lebar pangkal / ujung: sekitar 14 / 7 m;
- luas: sekitar 1.000–1.100 m².

Luas total sayap sekitar 2.800–2.900 m². Bentuk badan yang menghasilkan gaya angkat menambah luas aerodinamis efektif sekitar 20–30%.

Pada kecepatan subsonik, susunan ini memberi rasio angkat/hambat L/D sekitar 9–13, cukup untuk meluncur stabil dan memilih titik pendaratan secara terkendali. Kecepatan meluncur dan menyentuh air diperkirakan 90–120 m/detik, atau sekitar 320–430 km/jam. Keselamatan pada kecepatan ini lebih ditentukan oleh kecepatan vertikal saat menyentuh air, sudut serang, dan jalur turun daripada kecepatan horizontal mutlak.

4.3.5. Sistem parasut

Untuk mengurangi benturan pendaratan di air dan memperluas jendela yang diizinkan, wahana dilengkapi sistem parafoil yang dapat digunakan kembali sebagai jalur pendaratan lunak bila diperlukan.

- **Arsitektur dan penempatan:** terdapat dua posisi parafoil:

- satu di **bagian atas belakang** ;
- satu di **bagian atas depan**, tepat di belakang hidung.

Setiap posisi memakai skema N+1 — parafoil utama dan cadangan — dengan kemasan dan tali penarik terpisah. Kanopi tidak terikat pada satu titik, melainkan melalui **garis melintang ke rangka** pemikul, sehingga puncak beban lokal berkurang dan gerak angguk serta guling lebih stabil. Kedua kelompok dipisahkan sepanjang badan agar tidak saling mengganggu atau membelit.

- **Luas dan cara kerja:** parafoil tidak menahan seluruh berat wahana; fungsinya meredam kecepatan vertikal pada tahap akhir dan membentuk sentuhan lembut. Nilai perkiraan:
 - luas setiap parafoil utama: sekitar 4.500–6.000 m² ;
 - luas aktif total dua parafoil: sekitar 9.000–12.000 m² .

Sasaran kecepatan vertikal saat bersentuhan adalah $-V_z \approx 1 \text{ m/s}$.

- **Kriteria pengaktifan:** sistem hanya digunakan bila **diperlukan** . **Algoritme** pendaratan memperhitungkan **percepatan total** sebagai jumlah vektor komponen aerodinamis, inersial, dan hidrodinamis:
 - jika perkiraan percepatan total saat menyentuh **air tidak** melebihi 4 g, wahana **mendarat dengan sayap** tanpa parafoil;
 - jika **berisiko** melebihi 4 g, sistem diaktifkan, komponen kecepatan vertikal diturunkan ke sasaran, dan wahana beralih ke penurunan lembut.
- **Penggunaan kembali:** parafoil, tali, dan pengikat dirancang untuk banyak pemakaian dengan inspeksi, pengeringan, serta penggantian komponen aus, tanpa membongkar rangka utama badan.

4.3.6. Sistem daya dan penggerak mandiri

Wahana dilengkapi sistem energi dan penggerak yang sepenuhnya mandiri untuk seluruh siklus misi, dari manuver orbital hingga pelayaran mandiri selama berbulan-bulan.

- **Sumber energi utama: reaktor nuklir di wahana.**

- **Jenis:** reaktor cepat garam cair yang ringkas atau reaktor suhu tinggi berpendingin gas generasi baru; kelak modul fusi ringkas, misalnya dengan pemampatan medan seperti Helion Energy.
- **Daya:** 10–20 MW listrik dan 50–100 MW termal.
- **Fungsi:** memasok semua sistem wahana, unsur superkonduktor levitasi, pendorong **plasma elektromagnetik**, pendinginan aktif, dan **penggerak laut mandiri**. Reaktor bekerja tanpa pengisian ulang sepanjang umur wahana, 5–10 tahun.

- **Sistem superkonduktor wahana untuk levitasi** dan stabilisasi. Modul kriogenik dengan superkonduktor suhu tinggi, didinginkan oleh nitrogen atau hidrogen cair dari sistem wahana, dipasang di sepanjang badan. Medan utamanya menyediakan levitasi dan stabilisasi aktif. Bahkan bila daya luar terowongan gagal sepenuhnya, interaksi induktif dengan kumparan pasif yang bertindak sebagai «rel» mempertahankan levitasi melalui efek cermin magnetik.

Kendali stabilisasi disusun bertingkat:

- 1) **lingkar pasif**, mikrodetik: kopling induktif antara superkonduktor dan kumparan terowongan otomatis menghasilkan gaya pemulih pada setiap pergeseran, tanpa elektronik;
- 2) **lingkar perangkat** keras, mikrodetik hingga milidetik: rangkaian FPGA dan ASIC mendeteksi ketidakseimbangan dan mengalihkan segmen menurut algoritme tetap;
- 3) **lingkar perangkat** lunak, milidetik hingga puluhan milidetik: komputer wahana dengan dukungan AI terbatas membagi ulang arus antarsegmen superkonduktor untuk mengimbangi hanyutan lambat dan ketidakseimbangan lokal, tanpa memerlukan reaksi nanodetik.

Arsitektur ini bereaksi terhadap gangguan dalam milidetik, beberapa tingkat lebih cepat daripada kebutuhan kestabilan wahana 15.000 ton pada kecepatan hipersonik.

- **Pendorong utama:** pendorong **plasma elektromagnetik berdaya dorong tinggi**.
 - **Prinsip:** pendorong magnetoplasmadinamik atau impuls spesifik variabel seperti VASIMR, ditenagai reaktor wahana.
 - **Daya dorong:** hingga 50–100 kN atau 5–10 ton-gaya dalam mode pulsa; cukup untuk koreksi orbit, keluar dari orbit, dan perpindahan antarorbit.
 - **Propelan:** cadangan xenon, argon, atau hidrogen cair, yang juga digunakan untuk pendinginan.
 - **Kemandirian:** AI wahana menghitung dan menjalankan sendiri manuver merapat ke stasiun orbital, membongkar muatan, dan kembali.
- **Pengelolaan panas :**
 - **radiator yang dapat dibentangkan :** panel bersirkuit cairan dibuka di ruang angkasa untuk memancarkan kelebihan panas reaktor dan peralatan ke ruang hampa;
 - **penyimpan panas perubahan fase:** unsur penting di hidung dan titik terbebani. Menyerap puncak panas beberapa megajoule saat menembus atmosfer pada keberangkatan dan kepulangan, lalu perlahan membuang panas melalui radiator di ruang angkasa atau ke lingkungan di laut;
 - **pendinginan aktif: sirkuit tertutup** helium atau hidrogen cair untuk mendinginkan pelindung panas dan komponen penting dalam keadaan darurat saat terbang.
- **Redundansi dan keselamatan:** kendali reaktor ganda, sirkuit pendinginan mandiri, dan sarana darurat pembuangan panas. Rancangan tetap aman dalam setiap skenario, termasuk jatuh ke laut.

4.3.7. Sistem mandiri untuk pendaratan di air dan pelayaran

Setelah mendarat di wilayah Atlantik yang ditentukan, wahana beralih menjadi kapal yang sepenuhnya mandiri. Sistem yang digunakan:

- **penggerak laut:** dua pendorong azimuth yang dapat ditarik atau dua jet air, sangat lincah pada kecepatan rendah;
- **energi pelayaran:** reaktor nuklir atau fusi wahana memasok **penggerak dan sistem pada daya** minimum. Intinya cukup untuk pelayaran mandiri selama berbulan-bulan;
- **navigasi dan komunikasi:** navigasi satelit GPS/GLONASS dan inersial, radar dan lidar untuk mengenali keadaan permukaan, serta hubungan andal melalui satelit geostasioner;
- **pengereman akhir: sesaat** sebelum menyentuh air, sisa kecepatan 100–150 km/jam dikurangi dengan parasut rem **kecil untuk stabilisasi** dan perlambatan awal, lalu pulsa **singkat pendorong plasma utama untuk** mengatur tepat kecepatan vertikal. **Parasut dilepas setelah pendaratan;**

Susunan ini memungkinkan wahana menuju **sendiri pelabuhan pangkalan atau** bertemu kapal tunda tanpa bantuan segera. Wahana dapat bertahan **mandiri di laut bergelombang**, menempuh perjalanan jauh, dan tiba di dok yang ditentukan untuk perawatan terjadwal, berubah dari kendaraan antariksa **menjadi kapal** robotik.

4.3.8. AstroLiner-S: versi awal yang disederhanakan

Pada tahap awal StarRoad digunakan versi awal AstroLiner-S — Simplified / Start — sebagai konfigurasi dasar yang lebih sederhana secara teknologi dan lebih konservatif dalam operasi.

Varian ini berfungsi penuh, tetapi menyederhanakan energi dan sistem lainnya. Tujuannya untuk pengoperasian awal, peluncuran kargo dan berawak pertama, serta pengurangan risiko teknis, operasional, dan regulasi secara bertahap.

- **Gagasan utama AstroLiner-S:** menerapkan paradigma dasar StarRoad — menembus atmosfer dengan **inersia** — **tanpa sumber nuklir atau fusi di wahana, sambil mempertahankan** sepenuhnya dimensi dan massa peluncuran versi utama.

Semua operasi dengan kebutuhan daya ekstrem — percepatan, levitasi, dan stabilisasi di terowongan — sepenuhnya dilakukan oleh infrastruktur darat.

AstroLiner-S adalah:

- wahana angkut mandiri;
- dapat digunakan kembali sepenuhnya;
- mampu mencapai orbit, meninggalkannya, dan kembali dengan kemampuannya sendiri;
- menggunakan penggerak kimia saja di luar terowongan;
- tidak membawa sumber radiasi pengion berdaya tinggi.

- **Energi dan sistem superkonduktor: konfigurasi** AstroLiner-S sepenuhnya menghapus:

- pembangkit nuklir dan fusi;
- risiko radiasi, panas, dan kecelakaan yang terkait;
- skenario pencemaran permanen pada terowongan dan bagian gerbang.

Unsur superkonduktor untuk levitasi, stabilisasi, dan interaksi dengan jalur:

- diisi arus sebelum peluncuran;
- ditempatkan dalam mode arus persisten;
- diisolasi satu sama lain dan dikendalikan sistem wahana.

Baterai dan penyimpanan inersial roda gila memasok elektronik, kendali, dan perlindungan sepanjang siklus percepatan terowongan dengan cadangan waktu.

Selama percepatan, kendali aktif sirkuit superkonduktor dibatasi pada arus koreksi kecil dan keadaan darurat, sehingga tidak diperlukan sumber daya kontinu berdaya tinggi di wahana.

Di orbit, panel surya lipat digunakan sebagai sumber listrik aktif.

- **Penggerak di luar terowongan**

Semua operasi orbital AstroLiner-S memakai penggerak kimia.

Wahana dilengkapi:

- mesin kimia utama berdaya dorong sedang, kelas LOX/LH₂ atau LOX/LCH₄;
- sistem kendali sikap dan darurat ganda (RCS).

Penggerak memungkinkan:

- penyelesaian penyisipan ke orbit sasaran setelah keluar dari atmosfer;
- koreksi parameter orbit;
- keluar dari orbit;
- masuk kembali secara terkendali dan pulang.

Peniadaan pendorong listrik dan magnetoplasma pada versi ini disebabkan tidak adanya sumber listrik besar di wahana, bukan batas arsitektur keseluruhan.

- **Kepulangan dan penggunaan kembali**

AstroLiner-S mampu:

- keluar dari orbit secara mandiri;

- masuk atmosfer dengan landai dan terkendali;
- meluncur secara aerodinamis;
- mendarat di air dengan sayap dan sistem parafoil.

Ketiadaan reaktor sangat menyederhanakan:

- operasi laut;
- perawatan terjadwal;
- pemulihan wahana setelah pendaratan tidak terencana.

○ Peran AstroLiner-S dalam pengembangan StarRoad

AstroLiner-S direncanakan sebagai:

- versi produksi massal pertama wahana StarRoad;
- platform pengumpulan statistik peluncuran dan kegagalan;
- sarana pengoperasian sistem lebih dini;
- angkutan dasar infrastruktur orbital awal.

Seiring kemajuan proyek, hadirnya sumber daya ringkas berdaya tinggi, dan bertambahnya pengalaman operasi, AstroLiner-S dapat dilengkapi bertahap atau diganti AstroLiner penuh dengan pembangkit wahana dan pendorong plasma elektromagnetik.

AstroLiner-S bukan kompromi, melainkan tingkat awal yang logis agar StarRoad dapat beroperasi lebih cepat, lebih aman, dan dengan risiko sistem lebih kecil tanpa mengubah arsitektur dasar jalur.

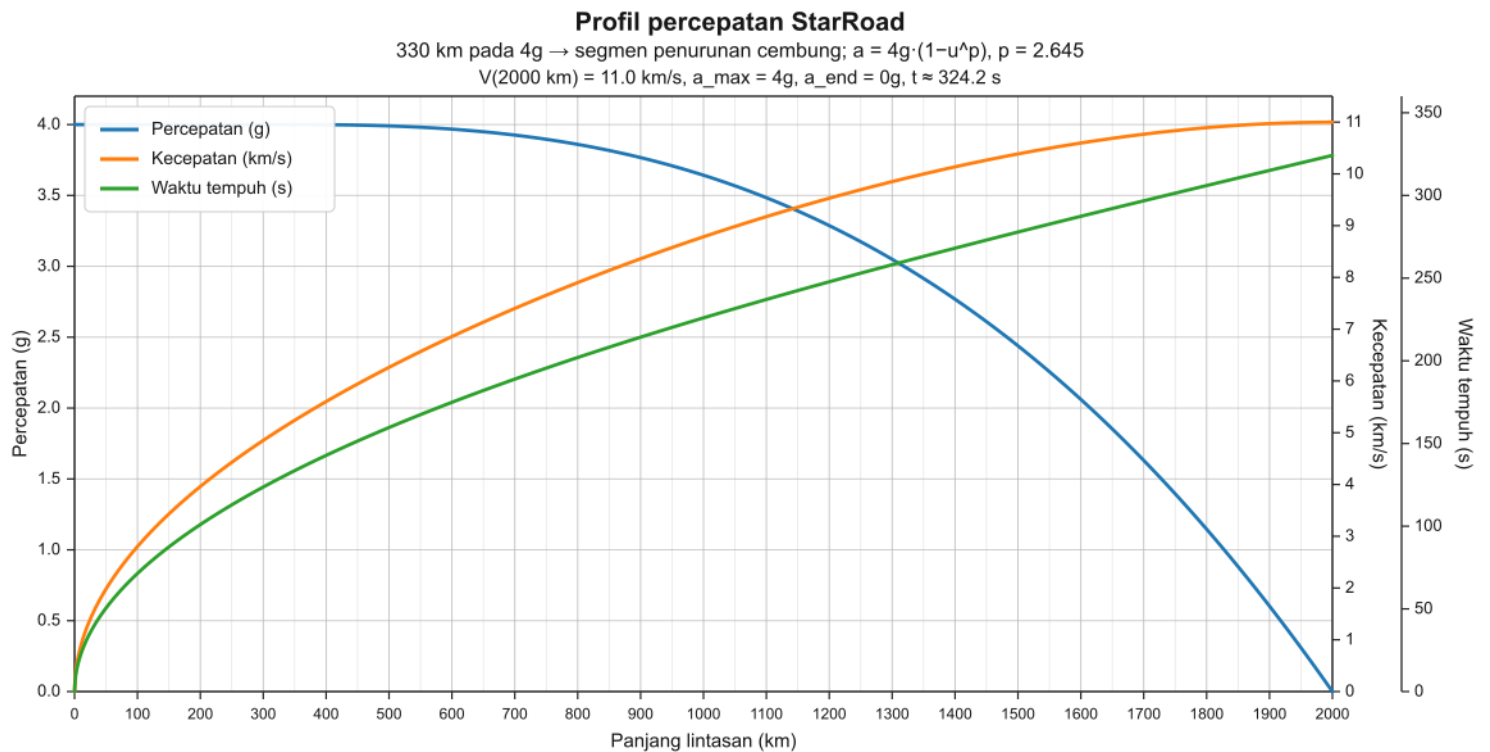
5. Siklus operasi dari persiapan peluncuran hingga perawatan setelah pendaratan

5.1. Persiapan dan peluncuran

Wahana bermuatan ditempatkan di ruang peluncuran dekat Batanga. Sistem wahana diuji terlebih dahulu, disusul sistem akselerator. Selanjutnya dilakukan uji prapeluncuran gerbang gasdinamik. Superkonduktor wahana diberi arus, lalu levitasi magnetik diaktifkan dan diperiksa. Terowongan telah divakumkan. Ketika perintah diberikan, penyaluran energi berdenyut ke segmen awal akselerator dimulai.

5.2. Akselerasi di dalam terowongan

- **0–330 km.** Percepatan longitudinal awal $\sim 4g$. Sebagian besar energi dipakai untuk levitasi dan melawan gravitasi.
- **330–~1.800 km, bagian menurun kurva S.** Percepatan longitudinal turun secara mulus dari $4g$ pada awal hingga nol. Saat melintasi lengkungan bawah tanah, wahana mengalami beban hingga $\sim 4g$. Unsur elektromagnetik di sekelilingnya menstabilkan lintasan.
- **~1.800–2.050 km, bagian menaik kurva S.** Percepatan turun hingga nol ketika mendekati gerbang. Selama 50 km terakhir, wahana melaju secara inersial dengan kecepatan ~ 11 km/s.



5.3. Keluar melalui gerbang atmosfer

- Berkas titik peluncuran yang tinggi, wahana mencapai ketinggian lebih dari 10 km di atas permukaan laut hanya ~30 km dari gerbang, sehingga dampak gelombang kejut pada wilayah sekitar menjadi sekecil mungkin. Satu menit sebelum wahana diluncurkan, cincin gerbang gasdinamik diuji tanpa membuka penutup mekanis. Setelah wahana menempuh 45% jalur terowongan, cincin mengalirkan udara mampat secara supersonik; udara ini telah dikumpulkan oleh pompa bagian terakhir ketika vakum dibuat. Sekitar 10 detik sebelum wahana melintas, hidrogen disalurkan dan penghalang gasdinamik diaktifkan pada mode pembakaran utama, membentuk aliran supersonik berbentuk kerucut yang stabil dari gas panas terionisasi sebagian. Tiga detik setelah cincin berhasil diaktifkan dan kerucut panas bergradien penghalang terbentuk, gerbang mekanis dibuka.
- Penghalang juga mencegah rusaknya vakum terowongan dan melunakkan kejut termal awal. Dalam hitungan milidetik, wahana melintasi zona gas renggang dan panas yang telah disiapkan. Teknologi penting ini mengubah profil waktu dampak aerodinamik awal dan meniadakan muka kejut yang sangat singkat saat berpindah medium.
- Penghalang gasdinamik tidak mengurangi gaya aerodinamik total. Penghalang menggeser beban tumbukan dari rentang mikrodetik ke milidetik, sehingga tegangan lokal, getaran, dan kejut termal pada struktur wahana turun secara kritis.
- Pintu mekanis terbuka segera setelah wahana melintas; cincin jet kemudian dimatikan tanpa penundaan.

5.4. Melintasi atmosfer

Pada lintasan balistik, wahana memanfaatkan massa inersial dan strukturnya yang kokoh untuk menembus lapisan atmosfer yang padat. Beban termal dan dinamik mencapai puncak pada 10–20 detik pertama.

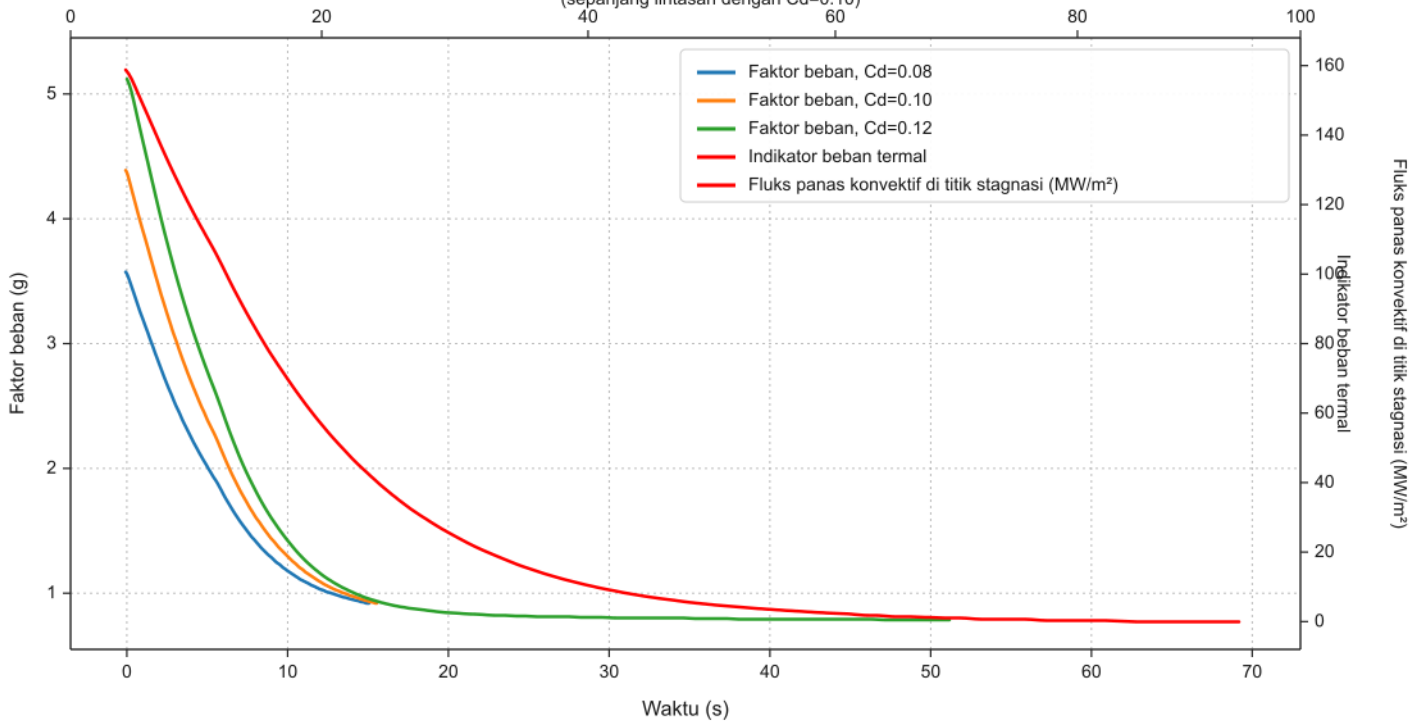
- **Penjelasan penting.** Setelah keluar dari zona penghalang gasdinamik, wahana langsung berinteraksi dengan atmosfer normal pada ketinggian yang ditetapkan, yaitu ~3.400 m. Semua perhitungan lintasan, fluks panas, dan beban didasarkan pada interaksi aerodinamik penuh dengan atmosfer, tanpa mengandaikan adanya “perisai gas”, “saluran”, atau volume renggang yang menyertai wahana.

StarRoad: beban mekanis dan termal terhadap waktu dan ketinggian

$C_d = 0.08, 0.10, 0.12$ (C_d adalah koefisien hambat aerodinamis)

Ketinggian di atas permukaan laut (km)

(sepanjang lintasan dengan $C_d=0.10$)



5.5. Memasuki antariksa dan operasi orbital

Setelah keluar dari atmosfer, radiator dibuka untuk membuang panas. Wahana kemudian mengaktifkan mesin plasma elektromagnetik di dalamnya untuk koreksi halus lintasan dan mencapai orbit tujuan—sering kali langsung melewati orbit geostasioner atau menuju titik Lagrange. Muatan lalu digelar. Dalam konfigurasi AstroLiner-S, penyisipan akhir dan koreksi orbit dilakukan dengan sistem propulsi kimia.

5.6. Keluar dari orbit dan kembali

Pada versi AstroLiner berfungsi penuh, keluar dari orbit dilakukan dengan mesin plasma elektromagnetik. Dalam konfigurasi AstroLiner-S, pengereman untuk keluar dari orbit, koreksi, dan manuver akhir dilakukan oleh sistem propulsi kimia.

5.7. Pendaratan di laut

Di atas Samudra Atlantik dekat Gabon, sistem parasut pengerem dibuka untuk mengurangi kecepatan. Wahana mendarat di air dengan sudut serang kecil pada bagian bawah yang diperkuat dan dirancang agar permukaan panas dapat bersentuhan dengan air dingin. Setelah mendarat, baling-baling atau jet air dibuka.

5.8. Penundaan dan perawatan

Mesin wahana yang ditenagai reaktor di dalamnya—atau kapal tunda siaga jika sistem wahana rusak—membawa wahana ke kompleks pelabuhan untuk diperiksa, dirawat, diperbaiki pelindung panasnya, dan disiapkan bagi penerbangan berikutnya. Dalam konfigurasi AstroLiner-S, perjalanan kembali ke pelabuhan ditopang baterai, unit daya tambahan, atau kapal tunda siaga.

6. Pelaksanaan, jadwal, persyaratan, dan pusat industri

6.1. Tahapan proyek

Pelaksanaan StarRoad dirancang sebagai rangkaian tahap yang saling terkait secara teknologi dan beralasan secara ekonomi. Setiap fase memiliki tujuan serta tolok ukur keberhasilan yang jelas dan membangun infrastruktur bagi fase berikutnya sehingga risiko teknis dan keuangan berkurang.

6.1.1. Tahap 0: konsep dan pengujian (2–5 tahun)

- **Tujuan:** memvalidasi prinsip fisika, mengembangkan teknologi kritis di laboratorium, dan membentuk landasan rekayasa.
- **Kegiatan utama**
 1. Pemodelan matematika dan CFD secara terperinci untuk seluruh proses: akselerasi, pengoperasian portal, dan benturan aerodinamis.
 2. Pembentukan konsorsium internasional serta kesepakatan politik dan hukum awal.
 3. Survei geologi dan lingkungan di sepanjang rute.
 4. Pembuatan lokasi uji penelitian di luar lokasi utama:
 - uji bangku modul levitasi superkonduktor dan sistem catu daya berpulsa;
 - pembangunan dan pengujian prototipe portal gas-dinamis skala 1:10 untuk memastikan penghalang bergradasi yang stabil dapat dibentuk;
 - Penggalian terowongan demonstrasi vakum pendek sepanjang 1–2 km untuk memvalidasi integrasi sistem vakum, akselerasi magnetik benda uji ringan, dan sistem keselamatan.
- **Kriteria keberhasilan:** data eksperimen yang menegaskan kelayakan solusi utama — gerbang, levitasi, dan stabilisasi — serta kesiapan rancangan rekayasa rinci Tahap 1.

6.1.2. Tahap 1: infrastruktur dan fondasi energi (5–7 tahun)

- **Tujuan:** membangun “tulang punggung energi” dan mengembangkan konstruksi robotik dalam kondisi lapangan.
- **Kegiatan utama**
 1. Penerapan produksi seri kecil untuk sistem robotik pengeboran terowongan standar berdiameter 2 meter.
 2. Penggalian paralel pasangan pertama terowongan kolektor utama SOTEG di sepanjang seluruh rute (~2.050 km) untuk membentuk sirkuit stabilisasi termal awal.
 3. Membangun pembangkit panas bumi pertama yang memakai CO₂ superkritis hasil penangkapan langsung dari udara (DAC) di titik utama rute.
 4. Menggali terowongan uji prototipe berdiameter kecil di atas kolektor—D=2 m, L=2.050 km—dengan sistem dasar untuk vakum, komunikasi, dan layanan.
- **Tolok ukur keberhasilan:** konfigurasi minimum sistem panas bumi berfungsi penuh dan mandiri secara energi; proses penggalian robotik berkecepatan tinggi telah terbukti dan menjadi landasan perluasan berikutnya.

6.1.3. Tahap 2: validasi skala kecil (status “Kompleks Ilmiah dan Instrumentasi”) (4–6 tahun)

- **Tujuan:** menguji sinkronisasi dan keselamatan sistem pada kecepatan realistis serta menghimpun data eksperimen yang unik.
- **Kegiatan utama**
 1. Di terowongan uji kecil, mempercepat dan mengerem benda uji inert dengan massa hingga beberapa ton pada kecepatan 1–11 km/s.
 2. Pengujian skala penuh prototipe gerbang gasdinamis skala 1:5 dengan lintasan sebuah wahana eksperimental kecil.
 3. Menguji hipotesis “pendobrak inersial” melalui peluncuran massa uji dengan struktur dan pelindung panas yang berbeda untuk mengukur beban percepatan serta aliran panas.
 4. Dimulainya perancangan rinci dan pembuatan prototipe sistem utama wahana skala penuh, termasuk magnet superkonduktor dan penyimpanan panas.
- **Tolok ukur keberhasilan:** seluruh sistem sinkronisasi bekerja stabil dan aman; keefektifan portal gas-dinamis terbukti; eksperimen menunjukkan beban spesifik turun ketika massa bertambah; rancangan awal wahana selesai.

6.1.4. Tahap 3: ruas berfungsi penuh dan prototipe wahana (4–7 tahun)

- **Tujuan:** mengintegrasikan dan menguji sistem dalam konfigurasi akhir pada ruas yang cukup panjang serta membuat prototipe terbang.
- **Kegiatan utama**
 1. Pembangunan ruas terowongan akselerasi utama yang berfungsi penuh sepanjang 50–200 km dengan penampang akhir $17,5 \times 12,5$ m, termasuk seluruh lilitan, penyimpan energi, dan terowongan layanan.
 2. Memperluas sistem panas bumi di bawah ruas tersebut menjadi konfigurasi lengkap tujuh terowongan.
 3. Membuat dan menguji secara menyeluruh prototipe wahana skala penuh tanpa propulsi di darat: sistem kriogenik, kekuatan struktur, dan pelindung panas.
 4. Pengujian terowongan terpadu: percepatan dan pengereman massa yang mewakili wahana pada beban hingga 8g dan kecepatan hingga ~ 4 km/s. Validasi seluruh protokol darurat (Alarm 1–3).
 5. Mengembangkan, menguji di darat, dan menyertifikasi reaktor nuklir kompak yang dipasang di wahana untuk AstroLiner versi berfungsi penuh.
- **Tolok ukur** keberhasilan: siklus akselerasi dan penghentian darurat berulang selesai tanpa kerusakan kritis; pemulihan energi terbukti efektif; wahana terbang dan reaktor siap untuk integrasi akhir.

6.1.5. Tahap 4: perpanjangan dan pengoperasian (10–15 tahun)

- **Tujuan:** menyelesaikan jalur pertama, mengintegrasikan wahana, dan mencapai kecepatan operasi.
- **Kegiatan utama**
 1. Memperpanjang terowongan akselerasi secara bertahap hingga panjang rancangan 2.050 km dengan mengoperasikan banyak mesin bor terowongan secara paralel.
 2. Memperluas infrastruktur panas bumi dan penyimpan energi berpulsa di sepanjang rute.
 3. Membangun kompleks akhir portal atmosfer dataran tinggi di Gunung Mohi.
 4. Mengintegrasikan sistem internal wahana lalu melakukan uji darat dan uji kecepatan rendah di terowongan.
 5. Peluncuran bertahap dengan peningkatan kecepatan dan massa secara perlahan hingga mencapai parameter rancangan 15.000 t dan ~ 11 km/s.
- **Tolok ukur** keberhasilan: peluncuran hipersonik pertama wahana berhasil menempatkan muatan pada orbit sasaran; frekuensi rancangan satu atau dua peluncuran per bulan tercapai.

6.1.6. Tahap 5: perluasan dan operasi industri (berkelanjutan)

- **Tujuan:** mengubah StarRoad menjadi infrastruktur global yang terus berkembang.
- **Kegiatan utama**
 1. Mengoperasikan jalur pertama dan menyempurnakan siklus logistik: pemuatan, perawatan, dan kepulangan.
 2. Memulai pembangunan jalur kedua dan jalur paralel berikutnya untuk meningkatkan arus kargo.
 3. Mengembangkan galangan orbital dan fasilitas pengolahan dengan pusat industri proyek sebagai basisnya.
 4. Membangun jaringan cabang: akselerator yang lebih pendek untuk manusia dan kargo khusus.
- **Tolok ukur** keberhasilan: biaya pengiriman turun di bawah US\$10/kg; peluncuran berlangsung setiap hari; rencana jalur utama berikutnya telah disetujui dan pembangunannya dimulai.

6.2. Pusat industri

- **Kompleks pesisir (muara Sungai Nyanga, Gabon):** pembangunan wahana, produksi modul untuk ruas awal terowongan, dan pelabuhan induk utama untuk perawatan wahana.

- **Kompleks dataran tinggi (Gunung Mohi dan dataran tinggi selatan, Republik Demokratik Kongo):** produksi modul untuk ruas berkecepatan tinggi dan tikungan-S akhir, serta perakitan dan perawatan mekanisme gerbang. Lokasi ini mencakup sistem elektrolisis dan penyimpanan hidrogen tiga saluran; bahkan dalam keadaan darurat, setiap saluran dapat memasok bahan bakar bagi ketiga cincin mesin penghalang gasdinamis gerbang. Daya elektrolisis disediakan oleh sumber lokal — SOTEG, tenaga air, tenaga surya, dan tenaga nuklir — yang terintegrasi ke dalam jaringan proyek.

6.3. Jangka waktu keseluruhan

Karena proyek ini memerlukan banyak teknologi dan solusi rekayasa maju yang sudah layak saat ini, serta banyak mesin bor terowongan yang bekerja secara paralel, pembangunan infrastruktur, dan dua pusat manufaktur, pelaksanaan terowongan pertama dari awal Tahap 0 hingga peluncuran komersial pertama pada Tahap 4 akan memerlukan sekitar 25–40 tahun. Jangka waktu ini sebanding dengan proyek megasains lain seperti ITER dan LIGO. Dalam kondisi tersebut, kemajuan terutama bergantung pada pendanaan serta koordinasi diplomatik dan hukum, bukan pada kelayakan teknis mendasar. Tugas ini ambisius, tetapi berpotensi dicapai oleh konsorsium global.

7. Masalah dan tugas yang ditangani

7.1. Pemanasan berlebih global

Memindahkan industri boros energi ke antariksa untuk mengurangi pencemaran panas dan tekanan terhadap biosfer Bumi.

7.2. Tugas ekonomi

Menurunkan biaya akses antariksa secara drastis agar energi surya, asteroid, sumber daya Bulan, dan akhirnya sumber daya planet layak secara ekonomi.

7.3. Tujuan strategis

Menciptakan sistem pengangkatan yang tangguh dan tidak bergantung pada cuaca, serta mampu mendukung industrialisasi orbital dan pertahanan planet.

7.4. Katalis teknologi

Proyek ini akan memacu kemajuan dalam daya pulsa, superkonduktivitas, teknologi hipersonik, propulsi nuklir, dan konstruksi terowongan robotik.

7.5. Kemandirian energi dan termal

Sistem energi termal panas bumi otonom (SOTEG) memenuhi kedua kebutuhan sekaligus. Sistem ini menghasilkan daya listrik kontinu hingga sekitar 15 GW, cukup untuk seluruh kebutuhan akselerator sekaligus menciptakan surplus komersial, dan mempertahankan lingkungan dingin yang dapat diperkirakan di sekitar terowongan utama. Hal itu memungkinkan pembangunan dan operasi pada lapisan batuan dalam yang aktif secara geotermal serta menghapus ketergantungan pada pembangkit eksternal yang rentan dan cuaca yang tidak menentu.

7.6. Jejak karbon

StarRoad menerapkan kontribusi lingkungan aktif. Proyek menjadi pengguna tetap CO₂ atmosfer terbesar di dunia: dalam keadaan superkritis, gas terus menjadi fluida kerja di sirkuit geotermal tertutup. Jutaan ton dikeluarkan dari siklus atmosfer dan terkurung dalam sistem industri selama berabad-abad. StarRoad pun menjadi alat rekayasa iklim yang mampu mengimbangi emisi seluruh sektor industri.

7.7. Potensi sosial dan lingkungan Kanal Induk Hidrotermal

Kanal utama hidrotermal bukan hanya bagian pendinginan, tetapi juga infrastruktur lintas benua dwiguna yang bermanfaat bagi wilayah:

- **irigasi:** pintu pengalih memungkinkan air kanal mengairi lahan sepanjang jalur dan mengubah wilayah kering menjadi «sabuk hijau» Afrika;
- **pengisian alami:** hujan ekuatorial yang sering otomatis mengisi kanal;

- **Pengolahan air termal.** Setelah penukar panas geotermal menaikkan suhunya menjadi +60°C, air pada dasarnya telah dipasteurisasi dan sesuai untuk irigasi aman, kebutuhan industri, serta—setelah penyaringan—kebutuhan rumah tangga dan air minum.
- **aliran gravitasi:** kemiringan alami dari 3.400 m di timur ke 0 m di barat menggerakkan air tanpa pompa dan tanpa biaya energi;
- **mikrohidro:** perbedaan tinggi memungkinkan deretan pembangkit kecil yang memasok energi terbarukan tambahan bagi jaringan lokal dan sistem.

StarRoad menjadi platform angkutan sekaligus agroenergi yang menyatu dengan pembangunan wilayah berkelanjutan.

7.8. Jaringan energi

Sistem geotermal mandiri dan jaringan pembangkitnya memasok kelebihan energi hijau untuk akselerator, kota, industri, dan pertanian sekitar.

7.9. StarRoad sebagai urat nadi ekonomi

StarRoad sebagai urat nadi ekonomi. Di satu sisi, StarRoad menjadi gerbang kargo planet untuk mengembangkan Tata Surya; di sisi lain, menjadi urat nadi ekonomi utama Afrika dan katalis bagi industrialisasi, kemandirian energi, dan ketahanan pangan. Rute tersebut bukan pekerjaan rekayasa terpencil yang berjalan di bawah tanah menuju kehampaan. Infrastruktur permukaannya — 40 terminal, dua pusat industri di Gabon dan Republik Demokratik Kongo, kanal hidrotermal utama, dan jaringan jalan — membentuk gugus pembangunan berkelanjutan linear yang melintasi Afrika Tengah dari barat ke timur. Di sepanjang 2.050 km rute, muncul lanskap unik dengan kawasan ekologi, teknologi, dan pertanian yang silih berganti. Gugus linear itu menjadi zona ekonomi mandiri tempat:

- energi dihasilkan dari sumber geotermal, mikrohidro, dan surya;
- pangan ditanam melalui pertanian beririgasi;
- barang industri dibuat, termasuk komponen wahana, modul terowongan, dan peralatan;
- kargo bergerak melalui jalan raya dan rel;
- sebuah pelabuhan antariksa yang terdiri atas kompleks peluncuran dan gerbang atmosfer beroperasi;
- CO₂ atmosfer dihilangkan di fasilitas penangkapan langsung dari udara.

7.10. Keselamatan infrastruktur kritis

Sejak awal, proyek ini mencakup langkah untuk menangani hidrogen dalam jumlah besar, kecepatan hipersonik, dan energi skala gigawatt secara aman. Perlindungan pasif dipadukan dengan pemantauan aktif dan respons otomatis sehingga membentuk standar keselamatan baru bagi instalasi energi besar dan sistem hidrogen.

7.11. Pemilihan lokasi dan kemampuan untuk diperluas

Lokasi portal harus memenuhi puluhan tuntutan yang saling bertentangan: ketinggian, logistik, keselamatan, kemampuan perluasan, dan hukum. Gunung Mohi serta dataran tinggi di dekatnya memungkinkan StarRoad dimulai dari tapak kecil di dataran tinggi lalu berkembang menjadi bandar antariksa terbesar di dunia tanpa berpindah tempat.

7.12. Koordinasi politik dan hukum proyek lintas benua

Lintasan rute melalui tiga negara ditangani lewat konsorsium internasional yang mencontoh megaprojek seperti CERN dan ITER. Infrastruktur bawah tanah dan aset energi sistem energi termal geotermal mandiri memperoleh status hukum khusus, dan manfaat dibagi dengan jelas di antara peserta. Proyek ini bukan beban yang mensyaratkan kestabilan politik; melalui saling ketergantungan dan akses istimewa ke masa depan serta teknologi yang dikembangkan selama konstruksi, proyek justru menjadi alat yang bernilai pada dirinya sendiri untuk menciptakan dan mempertahankan kestabilan.

7.13. Pertumbuhan evolusioner arus kargo

Frekuensi peluncuran bertambah bersama industri orbital. Tahap perintisan dengan 1 peluncuran per bulan membangun galangan orbital; tahap industri dengan 1–3 peluncuran per minggu membangun aset; tahap matang dengan peluncuran harian menopang pertumbuhan eksponensial ekonomi antariksa.

8. Pasar dan logistik orbital

Bagian ini menjawab pertanyaan utama tentang kelayakan ekonomi StarRoad: apa yang dapat diluncurkan dalam volume yang cukup untuk memanfaatkan koridor peluncuran kelas superberat? StarRoad tidak boleh dipandang sebagai sistem bagi segelintir misi luar biasa. Sasarannya adalah arus kargo besar, teratur, dan terindustrialisasi antara Bumi dan orbit tinggi.

Pasar awal utama StarRoad bukan konstelasi satelit di orbit Bumi rendah atau wahana ilmiah tunggal, melainkan energi orbital skala besar, infrastruktur komputasi, logistik antarorbit, permukiman orbital, galangan antariksa, dan industri luar Bumi yang kemudian tumbuh.

8.1. Masalah permintaan untuk peluncuran kelas superberat

Ekonomi roket konvensional dibatasi bukan hanya oleh biaya per kilogram, tetapi juga oleh sifat peluncuran itu sendiri: roket mengirim kargo dalam kelompok kecil yang terpisah, dengan porsi massa pendukung yang tinggi, perakitan orbital yang rumit, dan banyak operasi tersendiri. Karena itu, meskipun harga peluncuran turun, angkutan roket tetap menjadi logistik ekspedisi.

StarRoad menciptakan pasar dengan sifat berbeda. Tujuannya bukan sekadar meluncurkan muatan masa kini dengan lebih murah, tetapi memungkinkan muatan yang tidak akan pernah layak secara ekonomi di bawah logistik roket.

Muatan tersebut mencakup:

- o pembangkit listrik tenaga surya antariksa kelas gigawatt yang lengkap atau hampir lengkap;
- o pusat data orbital berukuran besar;
- o modul transmisi daya gelombang mikro;
- o rangka batang, radiator, cermin, dan panel berukuran besar;
- o galangan orbital dan lini perakitan otomatis;
- o modul hunian dan industri untuk EML4/5;
- o kapal tunda dan angkutan antarorbit;
- o modul propelan, daya, dan layanan;
- o komponen infrastruktur asteroid dan antarplanet masa depan.

Dengan demikian, StarRoad tidak bergantung pada pasar peluncuran antariksa yang ada sekarang. StarRoad menciptakan pasar baru, sebagaimana kereta api, pengiriman peti kemas, dan jaringan listrik tidak hanya melayani permintaan yang sudah ada, tetapi juga melahirkan ekonomi baru di sekelilingnya.

8.2. Pasar awal: tenaga surya antariksa dan pusat data orbital

Pada tahap pertama, kargo komersial dan strategis utama StarRoad seharusnya berupa pembangkit listrik tenaga surya antariksa kelas gigawatt. Platform energi besar yang dapat terbentang sendiri sepenuhnya atau sebagian ini dikirim AstroLiner-S langsung ke orbit sasaran atau lokasi operasinya.

Pembangkit listrik tenaga surya antariksa memenuhi beberapa kebutuhan sekaligus:

- o menciptakan permintaan bervolume besar dan berulang untuk peluncuran kelas superberat;
- o membentuk pasar energi yang tidak bergantung pada siklus siang-malam dan sebagian besar cuaca;
- o memungkinkan sebagian besar kapasitas pembangkitan baru ditempatkan di luar permukaan Bumi;
- o menjadi dasar pasokan daya bagi industri orbital;
- o menciptakan alasan ekonomi untuk membangun logistik orbital, galangan, dan permukiman layanan.

Konstanta surya di orbit Bumi sekitar $1.361,6 \text{ W/m}^2$. Karena itu, satu gigawatt sinar Matahari yang datang setara dengan sekitar $0,74 \text{ km}^2$ area pengumpul yang diarahkan dengan sempurna. Dengan efisiensi fotovoltaik 25–35%, kerugian konversi dan transmisi, celah struktur, radiator, elektronika daya, redundansi, serta degradasi, area pengumpul nyata untuk menghasilkan 1 GW listrik berguna mencapai beberapa kilometer persegi. Angka itu sangat besar menurut standar wahana antariksa konvensional, tetapi wajar bagi StarRoad, tempat massa, luas, dan dimensi struktur tidak lagi menjadi kendala utama.

8.2.1. Acuan massa pembangkit tenaga surya antariksa kelas gigawatt

Pembangkit kelas gigawatt bukan satelit kecil. Bahkan arsitektur modern yang paling optimistis menempatkan massa pembangkit 2 GW pada beberapa ribu ton. Konsep paling ringan seperti CASSIOPeiA diperkirakan sekitar 2.000 t, sedangkan kajian NASA yang lebih konservatif memberikan 5.900–10.000 t untuk sistem 2 GW yang setara.

Proyek / kajian	Daya	Massa	Relevansi bagi StarRoad
CASSIOPeiA / Space Energy Initiative / Frazer-Nash	hingga 2 GW dikirim ke jaringan	≈2.000 t	Acuan paling relevan bagi StarRoad: GEO/GSO, faktor pembangkitan 99,7%, arsitektur 1 satelit untuk 1 antena penyearah (rectenna), dan dalam kondisi terbaik daya spesifik mendekati 1 MW/t.
NASA 2024 RD1 / Innovative Heliostat Swarm	2 GW dikirim ke jaringan	≈5.900 t	Perkiraan yang lebih konservatif. NASA menormalkan sistem pada 2 GW yang dikirim ke jaringan; RD1 memiliki panel surya sekitar 11,5 km².
NASA 2024 RD2 / Mature Planar Array	2 GW dikirim ke jaringan, tetapi melalui beberapa sistem	≈10.000 t	NASA mencantumkan massa sekitar 10 juta kg dan luas panel surya sekitar 19 km². Karena RD2 membangkitkan daya dalam waktu lebih singkat, diperlukan lima sistem RD2 untuk menghasilkan energi yang kira-kira sama dengan satu RD1.
JAXA / Sasaki Tethered-SPS	rata-rata 0,75 GW / maksimum 1,2 GW	≈20.000 t per sistem	Acuan berat. Perkiraan kasar untuk keluaran rata-rata 2 GW menghasilkan sekitar 50.000 t atau lebih, sehingga memerlukan serangkaian penerbangan dan perakitan orbital, bukan satu peluncuran.
Caltech SSPP / ubin modular ringan	bukan pembangkit 2 GW lengkap, melainkan unit teknologi	untuk mengirim 2 GW ke Bumi, lapisan aktif saja secara teoretis berbobot ≈1.700–3.400 t	Dengan 160 g/m² dan efisiensi ujung ke ujung 7–14%, perkiraan ini hanya mencakup lapisan aktif. Pembangkit lengkap juga membutuhkan struktur, transmisi daya, kendali sikap, radiator, kabel, elektronika, fasilitas pemeliharaan, dan cadangan.

Tabel tersebut menghasilkan kesimpulan utama: **pembangkit tenaga surya antariksa 2 GW berbobot 2.000–10.000 t hampir tepat mengisi** ceruk AstroLiner. Bagi StarRoad, ini berarti satu peluncuran kelas superberat atau beberapa penerbangan dengan perakitan orbital minimal. Logistik roket akan memerlukan puluhan atau ratusan peluncuran roket superberat, rantai pengisian bahan bakar, perakitan orbital, penarikan menuju GEO atau EML, dan peningkatan tajam dalam kerumitan operasi.

8.2.2. Hasil energi satu pembangkit tenaga surya antariksa 2 GW

Dengan asumsi dasar berikut:

- o daya yang dikirim ke jaringan: **2 GW**;
- o ketersediaan / faktor pembangkitan: **99,7%**;
- o umur rancangan: **30 tahun**;

satu pembangkit menghasilkan:

- o **≈17,47 TWh per tahun**;
- o **≈524 TWh** selama 30 tahun.

Hal ini menjadikan biaya angkut per kilogram sebagai faktor mendasar. Dalam logistik roket, peluncuran tetap menjadi hambatan utama. Dengan StarRoad, komponen angkutan segera turun menjadi bagian kecil dari harga energi masa depan.

8.2.3. Komponen angkutan dalam biaya tenaga surya antariksa

Perhitungan di bawah hanya **mencakup komponen angkutan dari** biaya energi tersamaratakan: biaya pengiriman massa pembangkit dibagi dengan energi yang dihasilkan sepanjang umur 30 tahun. Perhitungan ini tidak mencakup pembuatan pembangkit, rectenna, pemeliharaan, asuransi, penggantian modul, infrastruktur darat, dan laba operator.

Rumus:

Komponen angkutan LCOE = massa pembangkit × biaya pengiriman / produksi energi sepanjang umur

Untuk pembangkit 2 GW dengan ketersediaan 99,7% dan umur 30 tahun, produksi sepanjang umur sekitar **524 miliar kWh**.

Tahap / sistem angkutan	Biaya pengiriman	Pembangkit sejenis CASSIOPeiA, 2.000 t, ¢/kWh	NASA RD1, 5.900 t, ¢/kWh	NASA RD2, 10.000 t, ¢/kWh
Logistik roket saat ini, acuan bawah menuju GTO	US\$3.600–5.600/kg	1,37–2,14	4,05–6,31	6,87–10,69
StarRoad, tahun 1–2	US\$80–120/kg	0,0305–0,0458	0,0901–0,1351	0,1527–0,2290
StarRoad, tahun 3–5	US\$30–50/kg	0,0114–0,0191	0,0338–0,0563	0,0572–0,0954
StarRoad, tahun 6–10	US\$10–20/kg	0,0038–0,0076	0,0113–0,0225	0,0191–0,0382
StarRoad, tahun 11–15	US\$3–8/kg	0,0011–0,0031	0,0034–0,0090	0,0057–0,0153
StarRoad, tahun 16–25	US\$0,8–3/kg	0,0003–0,0011	0,0009–0,0034	0,0015–0,0057
StarRoad, tahun 26 dan seterusnya	US\$0,3–1/kg	0,0001–0,0004	0,0003–0,0011	0,0006–0,0019

Sebagai perbandingan, LCOE fasilitas pembangkit darat modern yang baru dibangun bernilai beberapa sen per kWh: sekitar 3–4 ¢/kWh untuk angin darat, 4–5 ¢/kWh untuk fotovoltaik skala utilitas, dan 5–6 ¢/kWh untuk tenaga air. Perkiraan NASA bagi alternatif darat pada 2050 adalah sekitar 2–5 ¢/kWh.

Dari sini muncul kesimpulan penting: bahkan pada masa perintisan, komponen angkutan tenaga surya antariksa dengan StarRoad satu orde magnitudo lebih rendah daripada LCOE pembangkitan darat; pada tahap matang, komponen itu hampir lenyap sebagai faktor harga utama. Ini tidak berarti biaya total tenaga surya antariksa akan menjadi seperseribu sen. Pembuatan pembangkit dan rectenna, pemeliharaan, elektronika, radiator, penggantian modul, asuransi, dan laba operasi tetap ada. Artinya, StarRoad menghapus hambatan khusus yang membuat tenaga surya antariksa membebani ekonomi di bawah logistik roket.

Untuk skenario roket masa kini, gambaran lengkapnya lebih buruk daripada sekadar angka US\$3.600–5.600/kg. Pembangkit besar bukan hanya harus diluncurkan ke orbit, tetapi juga dikirim ke titik operasi, dirakit, dan dipelihara; kapal tunda harus diisi bahan bakar dan infrastruktur harus dipertahankan. Karena itu, NASA memperkirakan LCOE **dasar sekitar 61 ¢/kWh untuk RD1 dan 159 ¢/kWh untuk RD2**, jauh di atas alternatif darat. StarRoad bukan sekadar menurunkan biaya peluncuran: sistem ini mengubah kelas masalah dengan menggantikan ribuan operasi roket dengan satu atau beberapa penerbangan infrastruktur kelas superberat.

8.2.4. Pusat data orbital sebagai pasar awal kedua

Pusat data orbital dapat menjadi pasar awal kedua. Pertumbuhan kecerdasan buatan, komputasi awan, dan infrastruktur digital menjadikan pusat data komponen penting dalam permintaan energi global. IEA memperkirakan fasilitas tersebut sudah mengonsumsi ratusan TWh per tahun dan dapat mendekati sekitar 1.000 TWh per tahun dalam satu dasawarsa mendatang.

Menempatkan sebagian infrastruktur komputasi di dekat pembangkit tenaga surya antariksa menawarkan beberapa keuntungan:

- o akses langsung ke pembangkitan orbital yang berkelanjutan;
- o permintaan yang lebih kecil terhadap jaringan listrik darat;
- o kemampuan membangun bidang radiator besar di ruang hampa;
- o ketergantungan yang lebih rendah pada batasan setempat mengenai lahan, air, dan kapasitas jaringan;
- o pemakaian bersama infrastruktur energi, komunikasi, dan layanan dengan pembangkit surya.

Pada tahap awal, pembangkit orbital dan pusat data dapat diluncurkan sebagai platform terpisah atau sebagai kompleks energi-komputasi terpadu yang mencakup pembangkit surya, elektronika daya, radiator, modul komputasi, antena komunikasi, dan rangkaian transmisi gelombang mikro.

8.3. Dasar iklim dan industri bagi tenaga surya antariksa

Pembangkit surya antariksa tidak tepat disebut sekadar teknologi “hijau”. Perannya jauh lebih luas: pembangkit ini dapat menggantikan pembangkitan karbon bukan dengan mengurangi kenyamanan dan membatasi konsumsi, melainkan dengan membangun sistem energi yang lebih kuat.

Kebijakan iklim konvensional sering dianggap meminta masyarakat mengorbankan kenyamanan demi mengurangi emisi. StarRoad menawarkan jalan lain: alih-alih mengurangi kemampuan peradaban, sebagian besar pembangkitan baru ditempatkan di antariksa dan energi yang tersedia diperluas tanpa menambah emisi karbon sektor tenaga listrik.

Model ini tidak mengharuskan hidrokarbon lenyap sebagai sumber daya industri. Penggunaannya dapat dikurangi secara bertahap dalam pembangkitan listrik dan panas massal, tetapi dipertahankan serta dialihkan untuk bahan kimia, material, komposit karbon, produk sintetis, dan rantai produksi tempat karbon berfungsi sebagai bahan baku, bukan bahan bakar.

Bagi industri energi karbon saat ini, hal ini bukan hanya ancaman tetapi juga jalur transisi. Perusahaan, negara, dan dana yang terkait dengan infrastruktur minyak, gas, dan batu bara dapat memperoleh peluang investasi prioritas dalam tenaga surya antariksa, energi orbital, kimia hidrokarbon, dan material karbon. StarRoad kemudian menjadi mekanisme konversi terkelola bagi industri energi yang sudah mapan, bukan sekadar pesaingnya.

8.3.1. Skala penggantian energi

Satu gigawatt daya listrik kontinu menghasilkan sekitar 8,76 TWh per tahun. Pembangkit surya antariksa berdaya 2 GW dengan ketersediaan 99,7% menghasilkan sekitar 17,47 TWh per tahun.

Dengan demikian:

- o pembangkitan orbital 100 GW menghasilkan sekitar 876 TWh per tahun;
- o pembangkitan orbital 1 TW menghasilkan sekitar 8.760 TWh per tahun;
- o pembangkitan orbital 3 TW menghasilkan sekitar 26.280 TWh per tahun, sebanding dengan konsumsi listrik tahunan dunia saat ini.

Pembangkitan listrik dunia pada 2024 sekitar 30,8 ribu TWh, dan sumber fosil menyumbang kira-kira 18,2 ribu TWh. Skalanya jelas: penggantian sebagian pembangkitan karbon pun memerlukan ratusan atau ribuan gigawatt kapasitas baru yang andal, bukan puluhan.

8.3.2. Laju penggantian yang mungkin jika peluncuran StarRoad membawa pembangkit surya antariksa

Tabel memberi perkiraan teknis batas atas: apa yang terjadi jika sebagian besar peluncuran StarRoad mengirimkan satu pembangkit 2 GW yang terhubung ke jaringan pada setiap peluncuran. Ini bukan prakiraan dan bukan janji. Tabel hanya memperkirakan laju yang mungkin bila syarat lain terpenuhi: produksi seri, rectenna dan sambungan jaringan yang selesai, penerimaan politik dan hukum, pembiayaan, pemeliharaan, serta pasar energi yang mampu menyerap produksinya.

Masa operasi StarRoad	Peluncuran per tahun dalam model ekonomi	Kapasitas surya antariksa baru per tahun	Pembangkitan tahunan baru setelah pemasangan	Pangsa pembangkitan dari bahan bakar fosil pada 2024, ≈18,2 ribu TWh/tahun	Pangsa dari total pembangkitan listrik dunia pada 2024, ≈30,8 ribu TWh/tahun
Tahun 1–2	12–24	24–48 GW/tahun	210–419 TWh/tahun	1,2–2,3%	0,7–1,4%
Tahun 3–5	50–100	100–200 GW/tahun	873–1.747 TWh/tahun	4,8–9,6%	2,8–5,7%
Tahun 6–10	200–300	400–600 GW/tahun	3.493–5.240 TWh/tahun	19–29%	11–17%
Tahun 11–15	500–700	1.000–1.400 GW/tahun	8.734–12.227 TWh/tahun	48–67%	28–40%
Tahun 16–25	1000+	2.000+ GW/tahun	17.467+ TWh/tahun	96%+	57%+
Tahun 26+	1500+	3.000+ GW/tahun	26.201+ TWh/tahun	144%+	85%+

Tabel menunjukkan mengapa tenaga surya antariksa menjadi pasar utama yang alami bagi StarRoad. Dengan satu pembangkit 2 GW per peluncuran, operasi awal pun menciptakan aliran energi yang berarti; operasi matang menjadi perangkat berskala planet.

Tabel tidak boleh dibaca sebagai jadwal dekarbonisasi yang terjamin. Penggantian nyata tidak hanya dibatasi oleh kapasitas peluncuran StarRoad, tetapi juga oleh:

- o laju produksi pembangkit surya antariksa;
- o produksi elektronika daya, radiator, rangka batang, pemancar gelombang mikro, dan sistem kendali;
- o pembangunan rectenna di darat;
- o kapasitas jaringan listrik;

- o izin politik untuk transmisi daya gelombang mikro;
- o pembagian manfaat dan risiko secara internasional;
- o asuransi dan regulasi energi orbital;
- o pemeliharaan, perbaikan, dan pembuangan pembangkit pada akhir masa pakai;
- o persaingan dengan tenaga surya darat, angin, nuklir, hidroelektrik, dan geotermal.

Pernyataan yang tepat adalah: StarRoad **memungkinkan secara teknis laju penggantian yang sebanding dengan skala listrik fosil dunia, tetapi laju transisi sebenarnya ditentukan oleh produksi pembangkit, jaringan, rectenna, kebijakan, dan pasar.**

8.3.3. Konversi industri energi berbasis karbon

Jika produksi pembangkit mengimbangi peluncuran StarRoad, daya orbital berskala terawatt dapat dibangun dalam satu atau dua dasawarsa. Hal itu tidak menghapus energi darat, tetapi mengubah perannya: jaringan darat, nuklir, hidro, energi terbarukan, pembangkit geotermal, dan penyimpanan membentuk sistem hibrida tempat pembangkitan orbital memasok lapisan beban dasar, industri, dan ekspor.

Dalam skenario ini, energi berbasis karbon tidak sekadar “kalah”. Industri tersebut memperoleh jalur konversi:

- o pembangkit batu bara dan gas secara bertahap keluar dari pembangkitan beban dasar;
- o sebagian infrastruktur gas beralih ke fungsi cadangan, kimia, dan produk sintetis;
- o perusahaan minyak dan gas berinvestasi dalam tenaga surya antariksa, rectenna, kimia hidrokarbon, dan material karbon;
- o industri batu bara dapat beralih ke komposit karbon, reduktor, bahan baku kimia, dan material;
- o sejumlah perusahaan energi mapan menjadi operator pembangkitan orbital, rectenna, dan distribusi jaringan.

Pokok politik dan ekonominya bukan menuntut industri kuat segera menghancurkan dirinya, melainkan memberinya jalur transisi. Jika sektor energi karbon dapat mempertahankan atau meningkatkan margin melalui tenaga surya antariksa dan produksi kimia, penolakan terhadap transisi dapat jauh berkurang.

8.3.4. Perbedaannya dari “agenda hijau” konvensional

StarRoad mengusulkan perluasan energi, bukan penghematan paksa. Dasar iklimnya bukan mengurangi kemampuan peradaban, melainkan memindahkan kemampuan itu ke infrastruktur yang lebih berkelanjutan.

Ini berbeda dari pendekatan yang dianggap meminta orang “hidup lebih buruk demi iklim”. Tenaga surya antariksa bersama StarRoad mendukung gambaran lain:

- o lebih banyak energi, bukan lebih sedikit;
- o lebih sedikit emisi, bukan lebih sedikit industri;
- o lebih banyak daya komputasi yang tersedia, bukan pembatasan ekonomi digital;
- o lebih banyak elektrifikasi transportasi, produksi, dan kehidupan sehari-hari;
- o lebih banyak peluang bagi kawasan berkembang;
- o lebih sedikit ketergantungan pada sumber daya fosil sebagai bahan bakar, sambil mempertahankan karbon sebagai bahan baku industri.

Pendekatan ini lebih sesuai dengan logika peradaban StarRoad: proyek tidak meminta umat manusia menyusut; proyek membangun infrastruktur yang memungkinkan pertumbuhan tanpa jejak karbon lama.

8.3.5. Kesimpulan: tenaga surya antariksa sebagai pasar utama

Pembangkit surya antariksa kelas gigawatt bukan penggunaan sampingan StarRoad; pembangkit tersebut merupakan salah satu alasan utama kebutuhan ekonominya.

Keduanya bersama-sama:

- o menciptakan permintaan massal untuk peluncuran kelas superberat;

- menghasilkan pendapatan komersial yang jelas melalui penjualan energi;
- memasok energi bagi basis industri orbital masa depan;
- menciptakan permintaan untuk rectenna, relai, kapal tunda, galangan antariksa, dan permukiman layanan;
- memberi industri energi berbasis karbon bidang investasi baru;
- menyediakan mekanisme nyata bagi tindakan iklim berskala planet.

Dengan logistik roket, pembangkit surya antariksa tetap terlalu berat, mahal, dan rumit untuk dioperasikan. Dengan logistik StarRoad, pembangkit itu menjadi muatan produksi seri yang alami—bukan misi istimewa, melainkan produk energi dari industri infrastruktur skala besar.

8.4. Lokasi orbital: GEO dan EML4/5

Lokasi utama pembangkit tenaga surya antariksa dan infrastruktur terkait adalah orbit geostasioner dan titik Lagrange Bumi–Bulan EML4/5.

Orbit geostasioner sangat cocok untuk mengirim daya ke wilayah tetap di Bumi. Satelit atau platform energi di GEO mempertahankan posisi yang hampir tetap terhadap permukaan, sehingga menyederhanakan pengarahannya berkas gelombang mikro, penempatan rectenna darat, dan integrasi dengan jaringan regional. Ketinggian geostasioner sekitar 35.800 km di atas khatulistiwa.

EML4 dan EML5 cocok untuk permukiman besar, galangan, simpul industri, dan kelompok energi. Keduanya berada di titik sudut segitiga sama sisi dalam sistem Bumi–Bulan dan memiliki kestabilan jangka panjang yang lebih tinggi daripada titik L1/L2 yang segaris. Hal ini penting bagi industri massal: pembangkit besar, gudang, galangan, rangka perakitan, dan kompleks hunian dapat dibangun di sana tanpa terus menghabiskan banyak propelan untuk mempertahankan posisi.

Penggunaan GEO dan EML4/5 juga mengurangi konflik dengan orbit Bumi rendah. Pembangkit surya dan platform besar lainnya tidak perlu menempatkan jajaran raksasa di LEO, tempat jajaran itu akan menyebabkan polusi cahaya, risiko tabrakan, hambatan atmosfer sisa, dan gangguan terhadap astronomi. Orbit rendah tetap menjadi zona layanan bagi penurunan kapsul, operasi perantara, inspeksi, dan tugas khusus orbit rendah.

8.5. Tahap awal: penerbangan langsung AstroLiner-S

Tahap awal memakai AstroLiner-S, varian awal wahana yang disederhanakan dan berisiko lebih rendah. Wahana ini tidak membawa sumber daya nuklir atau fusi dan menggunakan propulsi kimia untuk penyisipan akhir, koreksi, keluar dari orbit, dan kembali.

Tujuan utama tahap awal adalah menciptakan arus kargo pertama tanpa menunggu seluruh infrastruktur orbital matang. Karena itu, AstroLiner-S harus mampu mengirim modul besar secara langsung:

- ke orbit geostasioner untuk memasang pembangkit surya dan relai energi;
- ke kelompok energi EML4/5;
- ke orbit berenergi tinggi untuk memasang pembangkit surya dan pusat data.

Kargo pada tahap ini terutama berupa struktur lengkap atau hampir lengkap:

- pembangkit tenaga surya antariksa yang dapat terbentang sendiri;
- modul transmisi daya;
- panel radiator besar;
- blok komputasi pusat data;
- struktur rangka batang;
- robot perakitan;
- stasiun layanan pertama;
- cadangan propelan dan fluida kerja;
- modul komunikasi, navigasi, dan kendali lalu lintas.

Keunggulan EML4/5 dan GEO dibandingkan LEO:

- Tidak ada masalah polusi cahaya dari satelit orbit rendah.
- Penerangan hampir terus-menerus bagi pembangkit surya, tanpa siklus siang-malam yang teratur.
- Posisi stabil terhadap Bumi dan Bulan.

Angka utama tahap ini:

- Frekuensi peluncuran: 1–2 per bulan, atau 12–24 per tahun.
- Muatan per penerbangan: 10.000 t.
- Arus kargo tahunan: 120.000–240.000 t.
- Biaya pengiriman: US\$80–120/kg.
- Orbit sasaran: EML4/5 dan GEO.

Pendekatan ini menghindari jebakan membangun seluruh infrastruktur antariksa sebelum memperoleh pendapatan. Muatan komersial pertama itu sendiri merupakan bagian dari infrastruktur masa depan.

8.6. Tahap matang: relai gelombang mikro dan infrastruktur layanan

Tahap matang dimulai ketika jumlah pembangkit, pusat data, dan platform besar cukup untuk mengoperasikan jaringan orbital secara terus-menerus. Tugas kemudian meluas dari meluncurkan fasilitas baru menjadi memelihara fasilitas yang sudah terpasang.

Unsur utama tahap matang:

- jaringan relai gelombang mikro di GEO;
- simpul layanan permanen di dekat kelompok energi utama;
- wahana perbaikan dan inspeksi;
- stasiun penyimpanan;
- kapal tunda orbital;
- permukiman permanen pertama dan awak bergilir di EML4/5;
- galangan otomatis dan semiotomatis;
- pusat angkutan EML1.

Relai gelombang mikro memungkinkan energi dibagikan dengan lebih luwes di antara wilayah Bumi, mengurangi ketergantungan pada geometri langsung antara pembangkit dan rectenna, serta membangun jaringan energi alih-alih sekumpulan pembangkit orbital yang terpisah. Di darat, sistem harus mencakup rectenna penerima, gardu konversi, penyimpanan penyangga, dan sambungan ke jaringan regional.

Pemeliharaan permanen memperpanjang umur pembangkit surya. Hal ini mendasar: tanpa pemeliharaan, keekonomiannya dibatasi oleh umur masing-masing modul. Jika panel, pemancar, radiator, elektronika, dan rangka batang dapat diganti di orbit, pembangkit menjadi fasilitas energi yang dapat dipelihara, bukan satelit sekali pakai.

8.7. Pembagian angkutan menurut lingkungan operasi

Logistik StarRoad yang matang memisahkan fungsi angkutan menurut lingkungan operasi, bukan mengandalkan satu wahana universal.

AstroLiner menangani angkutan Bumi-ke-orbit dan orbit-ke-Bumi. Wahana ini merupakan pengangkut berat orbital, pesawat layang untuk kembali, dan pengangkut peti kemas berat, tetapi tidak seharusnya menjadi wahana antarplanet serbaguna.

Angkutan antarorbit hanya beroperasi di antariksa. Wahana ini tidak memasuki atmosfer sehingga tidak membawa perisai panas pendaratan, sayap, sistem kelautan, atau badan yang diperkuat untuk pendaratan di air. Massa keringnya lebih rendah dan umurnya lebih panjang karena dioptimalkan untuk perjalanan antarsimpul orbit.

Kapsul khusus turun ke planet dan mengantarkan manusia atau kargo ke permukaan. Kapsul itu tidak seharusnya menjadi bagian dari badan utama AstroLiner: menurunkan ribuan ton hanya untuk mengantarkan sekelompok kecil orang atau sedikit kargo tidak masuk akal.

Hierarki angkutan adalah:

Lingkungan	Wahana utama	Fungsi
Bumi → orbit	AstroLiner / AstroLiner-S	pengangkutan kargo dan modul kelas superberat
Orbit tinggi dan titik Lagrange	angkutan dan kapal tunda antarorbit	angkutan antara LEO, GEO, dan EML1/2/4/5
Orbit → permukaan	kapsul penumpang dan kargo	penurunan manusia dan kargo
Simpul orbital	stasiun, gudang, dan galangan	penyimpanan, perakitan, perbaikan, dan pemindahan

Pembagian ini menurunkan massa kering setiap kelas wahana, mengurangi kompromi desain, dan membuat logistik antariksa lebih menyerupai pelayaran, lengkap dengan kapal peti kemas, kapal tunda, pelabuhan, gudang, galangan, dan kapal khusus.

8.8. Peran AstroLiner dalam logistik matang

AstroLiner bukan wahana serbaguna. Peran utamanya adalah sebagai wahana kelas superberat yang menjalankan siklus pengangkutan ke orbit dan sebagai angkutan kembali yang dapat digunakan ulang.

Wahana ini membawa ke atas:

- o peti kemas kargo;
- o modul penumpang;
- o modul propelan;
- o komponen konstruksi;
- o panel, rangka batang, kabel, dan radiator;
- o kapal tunda antarorbit, dalam keadaan terakit atau terpisah;
- o kapsul penurunan;
- o modul stasiun orbital;
- o komponen pembangkit dan pusat data.

Wahana ini terutama kembali dalam keadaan kosong atau membawa muatan balik terbatas:

- o awak;
- o sampel;
- o rakitan mahal yang dapat diperbaiki;
- o elektronika yang dipensiunkan;
- o komponen rusak atau yang dilepas.

Konfigurasi kembali harus seringan mungkin. Setelah menyelesaikan misi, massa kembali AstroLiner harus jauh lebih rendah daripada massa peluncurannya karena penerbangan meluncur, masuk atmosfer, dan pendaratan di air yang aman memerlukan massa sisa minimum. Mengembalikan ribuan ton muatan ke Bumi bukan tugas rutin; kapsul khusus atau modul kembali terpisah menanganinya.

AstroLiner mempertahankan delta-v sendiri dalam jumlah terbatas karena empat alasan:

1. kemandirian dari infrastruktur yang belum sepenuhnya terpasang;
2. kemampuan menggunakan rute alternatif;
3. skenario darurat;
4. keluwesan dalam operasi awal.

Namun, dalam sistem matang, kapal tunda dan angkutan khusus menyediakan sebagian besar delta-v antarorbit. Hal ini mengurangi tuntutan pada AstroLiner, memperpanjang umur badan, dan mempersingkat siklus peluncuran–pembongkaran–kembali–pemeliharaan–peluncuran ulang.

8.9. angkutan dan kapal tunda antarorbit

Angkutan antarorbit adalah armada antariksa permanen StarRoad. Wahana ini beroperasi di antara LEO, GEO, EML1, EML2, EML4/5, dan simpul lain tanpa memasuki atmosfer atau kembali ke Bumi.

Tugasnya mencakup:

- mengirim modul dari titik pembongkaran AstroLiner ke orbit sasaran;
- menarik pembangkit surya, pusat data, dan rangka batang besar;
- mengangkut propelan dan fluida kerja;
- mengangkut modul penumpang;
- memelihara dan mengganti komponen pembangkit;
- mengirim kapsul ke orbit layanan untuk turun;
- mengembalikan kapal tunda kosong ke EML1 atau EML4/5;
- mendukung galangan orbital.

Wahana ini dapat menggunakan propulsi listrik, magnetoplasmadinamik, nuklir-listrik, surya-listrik, atau hibrida. Karena tidak pernah perlu memasuki atmosfer, wahana dapat sangat dikhususkan: radiator besar, rangka batang ringan, tangki fluida kerja besar, unit propulsi yang dapat diganti, serta kemampuan dipelihara di galangan orbital.

Dalam arsitektur matang, angkutan antarorbitlah yang mengubah StarRoad dari sistem peluncuran menjadi jaringan transportasi antariksa.

8.10. Penurunan ke Bumi dan planet lain

Kapsul khusus melakukan penurunan sehingga AstroLiner tidak perlu menjadi wahana masuk kembali serbaguna untuk setiap tugas.

Jenis utama:

Kapsul Penumpang (PC) — kapsul untuk manusia, dirancang agar dapat masuk dengan aman, menangani keadaan darurat, mendarat mandiri, dan terintegrasi dengan modul penumpang.

Kapsul Kargo (CCap) — kapsul bagi kargo bernilai tinggi, sampel, peralatan, bahan biologis, elektronika, dan komponen yang harus kembali ke permukaan.

Kapsul Kembali Industri (IRC) — kapsul kargo yang diperkuat untuk mengembalikan bahan dalam jumlah besar jika pasar tersebut muncul pada tahap selanjutnya.

AstroLiner membawa kapsul ke orbit. Kapal tunda antarorbit, atau AstroLiner sendiri pada tahap awal, memindahkannya ke orbit layanan untuk turun. Setelah berpisah, setiap kapsul masuk dan mendarat secara mandiri.

Bulan, Mars, Venus, dan asteroid menggunakan sistem pendaratan tersendiri yang disesuaikan dengan setiap lingkungan. Tidak ada satu wahana penurunan universal yang dapat melayani semua benda Tata Surya karena atmosfer, gravitasi, fluks panas, kondisi debu, dan kebutuhan lepas landasnya terlalu berbeda.

8.11. Modul standar

Standardisasi adalah dasar logistik StarRoad. Sebagaimana peti kemas dalam pelayaran mengubah perdagangan dunia, modul orbital standar harus mengubah ekonomi antariksa.

Jenis modul dasar:

Modul Penumpang (PM) — modul penumpang bertekanan yang dapat digunakan di AstroLiner, angkutan antarorbit, stasiun orbital, atau kapsul penumpang. Isinya meliputi penopang kehidupan, kursi atau kabin, cadangan darurat, antarmuka tambat, dan titik pengikat standar.

Peti Kemas Kargo (CC) — peti kemas bertekanan atau tanpa tekanan untuk panel, rangka batang, radiator, kabel, peralatan, sistem robotik, suku cadang, dan barang habis pakai.

Modul Propelan (PrM) — modul penyimpan propelan, fluida kerja, air, oksigen, hidrogen, argon, xenon, atau media habis pakai lain untuk kapal tunda dan stasiun.

Modul Utilitas (UM) — modul daya, pengelolaan termal, komunikasi, atau kendali yang dapat mencakup panel surya, baterai, radiator, antena, konverter, penukar panas, dan elektronika kendali.

Modul Konstruksi (CM) — modul berisi rangka batang, balok, bagian kerangka, robot perakitan, sistem pengikat, tambatan, jalur kabel, dan struktur yang dapat dikembangkan.

Modul Transmisi Daya (PTM) — modul berisi antena gelombang mikro, larik berfase, elektronika daya, serta sistem pengarahan dan kendali berkas.

Setiap modul harus memiliki standardisasi untuk:

- kelas dimensi;
- antarmuka struktur;
- titik cengkeram robotik;
- antarmuka tambat;
- antarmuka listrik dan termal;
- identitas digital dan catatan pemeliharaan;
- rentang massa dan titik berat yang diizinkan;
- modus pengamanan dan pemisahan darurat.

Dengan demikian, stasiun, wahana, pembangkit, dan kompleks industri dapat dirakit sebagai gabungan blok standar, bukan dirancang sebagai kendaraan yang unik.

8.12. Hierarki infrastruktur orbital

Logistik orbital StarRoad tersusun sebagai hierarki simpul.

Bumi / StarRoad. Manufaktur,

perakitan, peluncuran, perbaikan AstroLiner, produksi modul, penyiapan propelan, pasokan energi, dan kendali arus kargo.

LEO.

Zona layanan untuk penurunan kapsul, inspeksi, keadaan darurat, operasi sementara, dan pemisahan kapsul sebelum masuk. Dalam sistem matang, LEO bukan gudang utama maupun sabuk industri yang terlalu padat.

GEO.

Zona relai gelombang mikro, platform energi, komunikasi, dan transmisi daya ke wilayah tetap di Bumi. GEO cocok untuk mengintegrasikan energi orbital dengan jaringan darat.

EML1.

Pusat angkutan utama sistem Bumi–Bulan. AstroLiner dapat tiba langsung untuk membongkar modul ketika muatan tidak memerlukan penerbangan langsung ke tujuan akhirnya. Gudang, kapal tunda, kendali lalu lintas, simpul perbaikan, dan stasiun transfer lift Bulan berada di sini.

EML1 harus sangat otomatis. Populasi tetap yang besar tidak diperlukan: manusia dapat tinggal di tabung lava Bulan yang lebih terlindung, di EML4/5, atau di stasiun besar, lalu pergi ke EML1 bila diperlukan.

EML2.

Zona ilmiah dan pengamatan untuk observatorium senyap radio, teleskop ruang jauh, stasiun uji, komunikasi ruang jauh, serta fasilitas ilmiah di dan dekat sisi jauh Bulan.

EML4 / EML5.

Pusat utama peradaban orbital matang: galangan, permukiman, stasiun industri, pembangkit besar, perakitan wahana antarplanet, gudang, pangkalan perbaikan, dan pusat kendali untuk perluasan selanjutnya.

8.13. Galangan orbital

Galangan orbital terutama didirikan di EML4/5. Tujuannya adalah merakit struktur yang tidak dapat atau tidak seharusnya diluncurkan secara utuh, bahkan oleh StarRoad.

AstroLiner mengirim bahan dan struktur ke sana sebagai kargo kemasan datar:

- panel;

- rangka batang;
- profil struktur;
- kabel;
- radiator;
- cermin;
- membran;
- tangki;
- rakitan penahan beban;
- sistem perakitan robotik.

Robot dan teleoperator melakukan perakitan. Manusia menangani pemeliharaan, pengawasan, perbaikan rumit, dan keputusan luar biasa, tetapi tidak seharusnya mengerjakan secara manual sebagian besar pekerjaan perakitan yang berbahaya.

Galangan membangun:

- pembangkit tenaga surya antariksa baru;
- bidang radiator besar;
- angkutan antarorbit;
- wahana antarplanet;
- stasiun hunian;
- kompleks pengolahan sumber daya asteroid;
- komponen megastruktur masa depan.

Pada tahap ini, StarRoad tidak lagi sekadar sistem peluncuran dari Bumi. StarRoad menjadi mata rantai bawah dalam rantai produksi: Bumi memasok komponen rumit, sementara antariksa secara bertahap mengambil alih perakitan, pemeliharaan, dan sebagian manufaktur.

8.14. Permukiman orbital dan Bulan

Permukiman permanen tidak muncul sebagai tujuan tersendiri, melainkan karena kebutuhan memelihara infrastruktur besar. Ketika jumlah pembangkit, galangan, kapal tunda, relai, simpul produksi Bulan, dan platform industri meningkat, pemeliharaan jarak jauh sepenuhnya tidak lagi memadai.

Bentuk utama permukiman orbital besar adalah stasiun berputar dengan gravitasi buatan, seperti torus Stanford atau turunannya. Stasiun tersebut terutama ditempatkan di lokasi stabil yang sesuai untuk pengembangan jangka panjang, termasuk EML4/5, dan berfungsi sebagai pusat hunian, layanan, medis, perbaikan, dan administrasi bagi industri orbital.

Personel tetap pangkalan Bulan dan permukiman industri sebaiknya tidak tinggal di Bulan itu sendiri, melainkan di stasiun dengan gravitasi buatan di EML4/5. Hal ini membatasi dampak kesehatan jangka panjang dari gravitasi Bulan yang rendah sambil menjaga personel tetap dekat dengan infrastruktur Bulan. Bulan kemudian terutama berfungsi sebagai lokasi kerja industri dengan giliran kerja di permukaan.

EML1 menjadi pusat transfer dan logistik utama sistem Bulan. Tempat ini memusatkan gudang, dermaga, kapal tunda, modul pengisian bahan bakar, fasilitas perbaikan, dan kendali lalu lintas bagi arus antara Bumi, Bulan, EML4/5, dan kawasan orbital lain. Menempatkan personel di dekat Bulan menyederhanakan pergantian giliran, tanggap darurat, perbaikan, dan kendali produksi Bulan dibandingkan berulang kali mengirim awak dari Bumi.

Lift Bulan yang menghubungkan permukaan Bulan dengan kawasan EML1 merupakan bagian penting arsitektur ini. Lift tersebut menyediakan pergerakan kargo dan penumpang yang teratur antara permukaan dan infrastruktur orbital: regolit, oksigen, logam, bahan konstruksi, serta modul industri naik; peralatan, barang habis pakai, dan awak bergilir turun. Lift itu memberi industri Bulan sambungan tetap ke galangan orbital, permukiman, dan logistik antarorbit tanpa peluncuran roket terus-menerus dari permukaan.

Karena gravitasi Bulan rendah, permukiman Bulan terutama akan berupa pangkalan industri terlindung yang dioperasikan dengan giliran kerja. Pangkalan ini mendukung kompleks pertambangan, pengolahan, energi, dan konstruksi; peralatan otomatis; produksi oksigen; pengolahan regolit; perakitan komponen lift Bulan; serta penyiapan kargo untuk EML1.

Perlindungan radiasi bagi **permukiman orbital dan Bulan** menggunakan beberapa lapisan:

- o pelindung pasif dengan air, polietilena, regolit Bulan, bahan bakar, atau persediaan teknis;
- o menempatkan wilayah paling terlindung di bagian tengah dan dalam;
- o perlindungan magnetik aktif untuk mengurangi fluks partikel bermuatan;
- o tempat perlindungan darurat untuk peristiwa proton Matahari.

Air, hidrogen, polietilena, bahan bakar, dan regolit Bulan sekaligus merupakan persediaan berguna dan massa pelindung radiasi. Perlindungan tidak harus menjadi bobot mati jika dapat dimasukkan ke dalam siklus operasi stasiun, pangkalan Bulan, lift Bulan, atau simpul EML1.

8.15. Analogi logistik: antariksa sebagai jaringan maritim

Sistem StarRoad yang matang lebih menyerupai logistik maritim daripada program peluncuran.

Dalam analogi ini:

- o **AstroLiner** adalah kapal peti kemas kelas superberat antara Bumi dan orbit;
- o **kapal tunda antarorbit** adalah kapal tunda pelabuhan dan samudra;
- o **angkutan antarorbit** adalah kapal rute jauh;
- o **EML1** adalah pelabuhan transit dan pusat distribusi;
- o **GEO** adalah tempat labuh energi dan komunikasi;
- o **EML4/5** adalah pelabuhan industri, galangan, dan kota;
- o **kapsul** adalah wahana pendarat khusus;
- o **modul PM, CC, PrM, UM, CM, dan PTM** adalah peti kemas dan blok fungsional.

Pendekatan ini mengubah budaya penerbangan antariksa itu sendiri. Misi unik digantikan jadwal, peredaran peti kemas, perbaikan, asuransi, standar, gudang, kendali lalu lintas pelabuhan, dan perputaran kargo industri.

8.16. Ekonomi arus kargo

StarRoad membalik aturan utama ekonomi antariksa. Dalam logistik roket, menghemat kilogram lebih murah karena setiap kilogram mahal. Dalam logistik StarRoad, standardisasi, produksi massal, dan peluncuran dalam kelompok besar lebih murah.

Hal ini mengubah pilihan rekayasa:

- o struktur dapat dibuat lebih kuat dan lebih mudah diperbaiki;
- o peralatan dapat memiliki margin rancangan lebih besar;
- o stasiun dapat dirancang sebagai fasilitas yang dapat dipelihara, bukan satelit sekali pakai;
- o massa radiator, pelindung, dan kerangka tidak lagi menjadi kendala mutlak;
- o platform besar menjadi lebih ekonomis daripada banyak wahana kecil berumur pendek.

Dampak ekonomi utama adalah bahwa StarRoad menciptakan pasar bagi fasilitas orbital, bukan hanya pasar peluncuran. Pendapatan dapat berasal bukan hanya dari pengiriman kargo, tetapi juga dari keikutsertaan dalam pembuatan, kepemilikan, dan pengoperasian pembangkit, pusat data, relai, kapal tunda, galangan, dan jaringan energi.

Model bisnis yang mungkin mencakup:

- o menjual peluncuran kepada pelanggan luar;
- o kontrak jangka panjang untuk infrastruktur energi;

- o memiliki dan mengoperasikan pembangkit tenaga surya antariksa;
- o usaha patungan dengan perusahaan energi;
- o menyewakan kapasitas pusat data orbital;
- o menjual daya melalui rectenna darat;
- o kontrak layanan fasilitas orbital;
- o tarif logistik untuk angkutan antarorbit;
- o asuransi, perbaikan, dan perpanjangan umur stasiun.

Pendekatan ini mengurangi ketergantungan pada satu pasar. Jika permintaan peluncuran dari luar tidak cukup, StarRoad menciptakan arus kargonya sendiri melalui program energi dan industri orbital.

8.17. Tahap pengembangan pasar dan logistik

Perkembangan permintaan dan logistik orbital berlangsung dalam empat tahap.

I. Tahap fondasi (10–20 tahun) — arus kargo energi. AstroLiner-S

meluncurkan pembangkit listrik tenaga surya berbasis antariksa yang lengkap atau hampir lengkap, pusat data, relai, modul layanan, dan kapal tunda pertama. Tujuan utamanya adalah membuktikan peluncuran rutin, membangun fasilitas energi komersial pertama, dan menciptakan pasar pembangkitan listrik orbital.

II. Tahap matang (20–50 tahun) — jaringan layanan orbital. Muncul

relai GEO, simpul EML1, stasiun layanan, wahana perbaikan, kapal tunda, serta permukiman permanen dan galangan pertama di EML4/5. AstroLiner secara bertahap beralih dari penerbangan langsung ke setiap tujuan menjadi sistem angkut berat yang membongkar muatan di simpul jaringan.

III. Tahap industri (50–100 tahun) — produksi di luar Bumi. Dimulai

pembangunan aktif wahana antarplanet, kompleks pengolahan asteroid, dan habitat orbital besar. Sistem semakin banyak menggunakan bahan dari luar Bumi sehingga mengurangi ketergantungan pada pengiriman bahan mentah dalam jumlah besar dari Bumi.

IV. Tahap evolusioner dan potensial (lebih dari 100 tahun) — infrastruktur Tata

Surya. EML4/5 menjadi titik keberangkatan untuk ekspansi di seluruh Tata Surya, pembangunan megastruktur, kawanan surya, silinder O'Neill, teleskop ruang jauh, dan misi antarbintang.

Urutan ini penting: StarRoad tidak memerlukan peradaban antariksa yang sepenuhnya berkembang sejak awal. Sistem ini dimulai dengan sumber permintaan yang jelas — energi dan komputasi — kemudian berkembang menjadi ekonomi antariksa yang lengkap.

8.18. Prospek evolusioner: penerus StarRoad

StarRoad tidak harus menjadi bentuk akhir infrastruktur transportasi planet. Sistem ini dapat dipandang sebagai tahap peralihan yang tetap diperlukan antara zaman roket dan megastruktur astrorekayasa yang matang.

Di antara sistem hipotesis yang dikenal — lift antariksa, cincin peluncuran, StarTram, cincin orbital, dan menara antariksa — hanya cincin orbital canggih yang pada akhirnya dapat melampaui kapasitas kargo StarRoad. Namun, struktur semacam itu membutuhkan industri orbital yang mapan dan kuat, bahan dalam jumlah sangat besar, galangan, energi, perakitan robotik, dan pengalaman mengoperasikan megastruktur.

Salah satu kemungkinan penerus StarRoad adalah sistem dua cincin yang terhubung:

- o cincin angkutan yang mengelilingi Bumi, dengan titik terendah bertemu permukaan;
- o cincin pelabuhan geosinkron dan dok antariksa pada ketinggian GEO;
- o beberapa rotor kabel bergerak di dalam poros tertutup pada cincin angkutan;
- o sambungan antara cincin angkutan dan cincin pelabuhan geosinkron pada titik tertinggi lintasan.

Seperti cincin peluncuran, cincin angkutan memuat rotor yang bergerak cepat dalam saluran tertutup, tetapi dapat dibuat lebih aman. Tidak seperti cincin peluncuran, rotor kabel bergerakaknya tidak berbelok tajam dan menerima beban radial yang jauh lebih rendah; bila putus dalam keadaan darurat, rotor dapat dirancang agar menjauh dari planet tanpa

menghancurkan seluruh struktur. Cincin angkutan akan menjadi menara antariksa berbentuk cincin yang dinamis, membentang dari permukaan hingga cincin pelabuhan geosinkron.

Sistem ini bukan alternatif bagi StarRoad pertama, melainkan kemungkinan penerusnya. Tanpa StarRoad atau sistem tulang punggung setara, massa, peralatan, galangan, dan kapasitas energi yang dibutuhkan cincin orbital tidak dapat diluncurkan dengan biaya yang cukup rendah.

8.19. Potensi rekayasa planet: Tata Surya sebagai satu sistem sumber daya

StarRoad pada akhirnya dapat membuka kemungkinan yang kini tampak mustahil, termasuk astrokayasa skala besar dan terraforming. Ini adalah skenario peradaban tahap lanjut yang baru muncul setelah tersedia infrastruktur Tata Surya yang matang: pengangkatan kargo murah dari Bumi, tenaga surya antariksa, galangan orbital di EML4/5, penambangan asteroid, angkutan antarplanet, armada kapal tangki, dan energi mandiri bagi misi ruang jauh.

Gagasan utamanya adalah memperlakukan Venus dan Mars bukan sebagai dua program terpisah, melainkan satu sistem sumber daya. Mars kekurangan nitrogen, hidrogen, atmosfer padat, dan perlindungan magnetik. Venus memiliki cadangan CO₂ dan nitrogen yang sangat besar, serta massa dan gravitasi mirip Bumi, tetapi semuanya terkurung dalam lingkungan ekstrem: suhu sekitar 460 °C, tekanan sekitar 92 atmosfer, atmosfer CO₂, awan asam sulfat, tidak ada medan magnet, dan rotasi retrograd yang sangat lambat.

8.19.1. Tahap pendahuluan: infrastruktur Tata Surya

Sebelum terraforming planet dimulai, harus tersedia:

- StarRoad sebagai jalur murah untuk mengangkat massa dari Bumi;
- pembangkit tenaga surya antariksa dan kawanan surya sebagai sumber energi;
- galangan orbital di EML4/5;
- penambangan asteroid canggih untuk logam, air, dan zat mudah menguap;
- puluhan atau ratusan permukiman antariksa yang maju dan mandiri beserta simpul energi pendukungnya;
- armada kapal tangki yang membawa hidrogen, air, nitrogen, dan CO₂;
- sistem angkutan nuklir-listrik atau fusi untuk rute panjang.

Waktu awal yang masuk akal bagi program tersebut adalah paling cepat 100 tahun setelah StarRoad mulai beroperasi, dengan kemungkinan percepatan jika infrastruktur antariksa tumbuh secara eksponensial.

8.19.2. Venus: tahap terraforming

Venus mungkin lebih cocok daripada Mars bagi permukiman manusia besar dan berjangka panjang: gravitasinya sekitar 0,9g, massanya mendekati Bumi, dan energi surya berlimpah. Masalah utamanya adalah hambatan awal yang luar biasa tinggi.

1. Pendinginan dan pengendapan

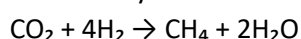
CO₂. Sebuah pelindung Matahari besar ditempatkan di titik L1 Venus–Matahari untuk mengurangi energi masuk. Dalam pendinginan mendalam, sebagian besar CO₂ menjadi cair atau padat dan mengendap di permukaan. Tekanan turun tajam, mengubah lingkungan bak neraka menjadi dunia yang dapat dijangkau kegiatan rekayasa dan konstruksi.

2. Cincin kuasisinkron dan pelabuhan orbital.

Setelah pendinginan, sebuah cincin yang ditopang secara dinamis dibangun sekitar 33.400 km di atas permukaan, pada ketinggian orbit sinkron 24 jam Venus di masa depan. Kelilingnya sekitar 248.000 km, gravitasi lokal sekitar 0,021g, dan kecepatan orbit lingkaran bebas sekitar 2,87 km/s. Selama Venus masih berputar terlalu lambat, rotor aktif menopang cincin tersebut, yang berfungsi sebagai pelabuhan orbital, simpul energi, dan titik penerimaan kapal tangki.

3. Pengolahan atmosfer dan impor hidrogen

. CO₂ yang mengendap diangkat ke kompleks pengolahan. Hidrogen datang dari Tata Surya luar, benda es, dan sumber daya asteroid. Reaksi dasar pengikatan CO₂ adalah:



Air digunakan untuk membentuk samudra dan menghasilkan oksigen; metana menjadi bahan bakar dan bahan baku kimia; karbon diikat dalam bahan dan penyimpanan jangka panjang; senyawa belerang diubah menjadi bentuk mineral. Kelebihan nitrogen dan sebagian CO₂ dapat dikirim ke Mars.

4. Venus yang layak

huni. Terraforming utama dapat dianggap selesai setelah terbentuk samudra, atmosfer nitrogen–oksigen, iklim terkendali, perlindungan magnetik atau magnetosfer, dan biosfer awal. Venus dapat layak huni bahkan selama periode rotasi peralihan sekitar 120 jam: malam sekitar 60 jam diredam oleh samudra, awan, atmosfer 1,3–1,6 bar, perpindahan panas, serta sistem cermin dan pelindung.

5. Koreksi orbital terhadap rotasi dan hari 24 jam. Membawa Venus

ke periode 24 jam bukan syarat kelayakhunian, melainkan penyempurnaan rekayasa jangka panjang. Peralihan dari rotasi retrograd saat ini ke rotasi langsung 24 jam membutuhkan penambahan momentum sudut sekitar $4,3 \times 10^{33}$ kg·m²/s. Dengan kecepatan buang fluida kerja sekitar 100 km/s, dibutuhkan sekitar $1,1 \times 10^{21}$ kg fluida kerja. Dengan energi kinetik jet ideal mendekati 5×10^{30} J, daya 300 EW menghasilkan waktu sekitar 500–600 tahun. Jika kerugian rekayasa dan energi 10^{31} – 3×10^{31} J diperhitungkan, waktu menjadi sekitar 1.000–3.000 tahun pada 300 EW dan beberapa ribu tahun pada 100–200 EW. Dua cincin angkutan yang terhubung secara simetris di sisi berlawanan planet dan cincin kuasisinkron memindahkan momentum rotasi dari cincin ke permukaan. Dua cincin, bukan satu cincin seperti pada konfigurasi Bumi dan Mars, memberikan kestabilan dinamis tambahan selama pemindahan. Setelah periode 24 jam tercapai, cincin menjadi dok Venus yang sepenuhnya sinkron.

8.19.3. Mars: tahap terraforming

Mars lebih mudah bagi pangkalan awal, tetapi lebih sulit diubah menjadi lingkungan planet yang lengkap. Keterbatasannya meliputi gravitasi sekitar 0,38g, atmosfer tipis, nitrogen yang terlalu sedikit, zat mudah menguap yang sukar diakses, dan perlindungan magnetik yang lemah. Karena itu, Mars memerlukan bukan hanya rekayasa lokal, tetapi juga bahan yang diimpor dari Venus, asteroid, dan Tata Surya luar.

1. Magnetosfer buatan.

Perlindungan magnetik adalah syarat pertama terraforming jangka panjang: cincin orbital seperti cincin sinkron dan angkutan yang direncanakan bagi Bumi, platform energi dan pemantul, serta sistem magnetik yang menyatu dengan cincin sinkron. Tanpanya, atmosfer baru tetap rentan terhadap angin Matahari dan kehilangan bertahap. Seperti cincin kuasisinkron Venus, cincin sinkron Mars menggabungkan fungsi angkutan, orbital, energi, dan magnetosfer. Panel surya dan penyimpanan terintegrasi memberi daya pada sirkuit magnetosfer, elektronika daya, dan infrastruktur kendali cincin yang mempertahankan medan magnet buatan planet.

2. Impor atmosfer dan

air. Nitrogen dan sebagian CO₂ datang dari Venus; air berasal dari asteroid, benda es, dan Tata Surya luar. Mars tidak diterraformasi sendiri: jaringan sumber daya bersama memasok zat mudah menguap yang kurang. Mengimpor atmosfer Venus lebih cepat memberi Mars iklim yang lebih sejuk dan stabil daripada menciptakan dan memanaskan atmosfer hanya dari sumber daya planet itu sendiri.

3. Penebalan atmosfer dan pemanasan iklim. Setelah

perlindungan magnetik tersedia, CO₂, nitrogen, uap air, dan zat rumah kaca lain secara bertahap menebalkan atmosfer. Atmosfer yang lebih padat mengatasi sebagian masalah suhu Mars, meningkatkan perpindahan panas dan tekanan, serta memperluas wilayah tempat air cair dapat bertahan.

4. Air, tanah, dan biosfer

. Penampungan air dibuat, regolit diolah, racun tanah dikurangi, dan ekosistem mikroba serta tumbuhan dibangun. Pengembangan berlangsung bertahap: biosfer lokal terlindung, kemudian zona iklim regional, dan baru setelah itu upaya menstabilkan lingkungan global.

5. Lingkungan yang dapat

digunakan pada skala planet. Dengan impor nitrogen, CO₂, dan air yang memadai, Mars dapat memperoleh atmosfer padat yang diatur, perlindungan magnetik buatan, cadangan air, wilayah yang aktif secara biologis, dan infrastruktur industri besar. Dengan 0,38g, Mars mungkin tetap kurang sesuai daripada Venus bagi permukiman manusia besar, jangka panjang, dan menyerupai Bumi, tetapi gravitasi rendah memiliki keunggulan sendiri: pendakian dan pendaratan lebih murah, logistik orbital yang mudah, pembangunan struktur raksasa, manufaktur dalam gravitasi rendah, serta peran sebagai pusat industri, ilmiah, dan transit antara Tata Surya dalam dan sabuk asteroid.

8.19.4. Keunggulan skenario gabungan

Skenario gabungan Venus–Mars–Tata Surya luar lebih kuat daripada salah satu pendekatan terpisah. Terraforming Mars saja dibatasi kekurangan nitrogen, air, energi, dan perlindungan magnetik. Terraforming Venus saja memerlukan pengolahan atmosfer CO₂ yang sangat besar tanpa pengguna luar bagi kelebihannya. Model bersama mengubah masalah satu planet menjadi sumber daya bagi planet lain: nitrogen dan CO₂ Venus mendukung Mars, hidrogen dan air Tata Surya luar mendukung Venus, sedangkan industri asteroid memasok logam dan massa konstruksi.

Dalam logika ini, StarRoad bukan alat terraforming langsung, melainkan mata rantai pertama dalam rantai sebab akibat: StarRoad mengangkat massa dengan murah; pembangkit surya antariksa menyediakan energi; EML4/5 memungkinkan galangan; penambangan asteroid menyediakan bahan baku; armada kapal tangki menukar materi antarplanet; baru setelah itu rekayasa planet menjadi mungkin.

8.20. Kesimpulan strategis

StarRoad dan AstroLiner menciptakan ekonomi antariksa permanen, bukan program peluncuran.

Pasar awalnya adalah tenaga surya antariksa, pusat data orbital, dan infrastruktur energi. Pasar matang mencakup pemeliharaan, perbaikan, relai energi, logistik antarorbit, galangan, dan permukiman. Tahap industri menciptakan ekonomi asteroid dan antarplanet. Tahap evolusioner membuka jalan bagi megastruktur, misi jauh, dan perluasan peradaban jangka panjang.

Gagasan utama bagian ini adalah bahwa StarRoad tidak mencari pasar dalam model lama penerbangan antariksa. StarRoad menciptakan pasar baru tempat arus kargo massal, energi orbital, infrastruktur komputasi, dan industri antariksa membentuk satu sistem logistik.

9. Model ekonomi proyek

9.1. Metode dan asumsi utama

Model ekonomi ini berlandaskan prinsip berikut:

- o **Produksi seri dan manufaktur internal:** skala produksi menurunkan biaya mesin bor terowongan, generator, dan penyimpanan sebesar 30–50%.
- o **Lokalisasi:** memanfaatkan sumber daya, tenaga kerja, dan bahan Afrika, dikalibrasi dengan Spon's African Construction Cost Handbook.
- o **Harga pasar terkini:** data 2025–2026 untuk BESS dan pembangkit panas bumi.
- o **Kurs indikatif:** 1 USD ≈ 100 RUB / 0,90 EUR. Semua perhitungan memakai dolar konstan 2025, tanpa inflasi. Ketidakpastian ±30% lazim pada studi prakelakan.

9.2. Biaya penggalian dalam kondisi Afrika

Spon's African Construction Cost Handbook merinci biaya tenaga kerja dan bahan di 13 negara Afrika. Buku ini tidak memberi harga satuan langsung untuk terowongan berpenampang sangat besar karena kondisinya amat beragam, tetapi tetap dapat dipakai untuk mengkalibrasi estimasi.

Jenis pekerjaan	Volume	Biaya rata-rata per km	Biaya total (miliar USD)	Dasar perkiraan
Terowongan utama (17,5 × 12,5 m)	2.050 km	12–18 juta dolar AS	\$24.6–36.9	Ekstrapolasi data dunia untuk penampang besar, disesuaikan dengan kondisi Afrika.
Terowongan pengumpul (6 × 2.050 km, ø2 m)	12.300 km	3–5 juta dolar AS	\$36.9–61.5	Berdasarkan pekerjaan tambang nyata di Afrika: 3.500 dolar AS/m untuk penampang kecil.
Terowongan layanan (ø3 m)	2.050 km	4–6 juta dolar AS	\$8.2–12.3	Seperti terowongan pengumpul, dengan penyesuaian untuk penampang lebih besar.
Terowongan miring (40 × 16 km, 17,5 × 12,5 m)	640 km	12–22 juta dolar AS	\$7.7–14.1	Seperti terowongan utama, ditambah biaya untuk kemiringan 30°.
Total panjang galian	17.040 km		\$77.4–124.8	

9.3. Armada mesin bor terowongan buatan sendiri

Pesanan seri 40 mesin utama, 240 mesin pengumpul, dan 40 mesin layanan, dengan lini perakitan di Gabon dan Republik Demokratik Kongo, menurunkan biaya 30–50%.

Jenis perisai	Diameter	Jumlah	Harga satuan, produksi seri dan internal	Total (miliar USD)
Mesin bor utama (SR-Main)	sekitar 18 m	40 unit	35–60 juta dolar AS	\$1.4–2.4
Mesin bor pengumpul (SR-Collector)	2 m	240 unit	0,8–1,5 juta dolar AS	\$0.19–0.36
Mesin bor layanan (SR-Service)	3 m	40 unit	1,2–2 juta dolar AS	\$0.05–0.08
Pabrik perakitan (2)	—	—	1–2 miliar dolar AS	\$1–2
Total mesin bor terowongan				\$2.64–4.84

9.4. Sistem energi termal panas bumi otonom

Pembangkit panas bumi Menengai di Kenya yang benar-benar dibangun, berkapasitas 35 MW, menelan sekitar 35–40 juta dolar AS atau 1.000–1.250 dolar AS/kW, termasuk pengeboran dan sumur uap. Dengan 40 pembangkit yang dibangun seri dan produksi lokal, biaya satuannya diperkirakan 800–1.200 dolar AS/kW.

- Biaya satu pembangkit 2,5 GW: US\$2–3 miliar.
- Biaya 40 pembangkit: US\$80–120 miliar.

Perkiraan berada antara biaya bawah pembangkit geotermal Rusia, sekitar US\$650/kW menurut data Iturup, dan biaya atas proyek rumit sekitar US\$1.500/kW. Perhitungan memakai perkiraan atas 100 GW untuk total daya sistem. Daya nyata baru diketahui setelah penyelidikan geologi dan bisa jauh lebih kecil, hingga beberapa gigawatt. Dana yang tersisa akan digunakan untuk sumber pembangkitan lain.

9.5. Sistem penyimpanan energi

Penyimpanan dibagi menjadi tiga tingkat:

9.5.1. Tingkat primer: penyimpanan jangka panjang di terminal

Dipasang di 40 terminal, sistem ini menyimpan 360 GWh yang diperlukan untuk satu peluncuran beserta cadangannya. Teknologi pilihan pada harga saat ini:

Teknologi penyimpanan	Biaya satuan	Sumber
Penyimpanan gravitasi	50–100 dolar AS/kWh	Pengalaman Energy Vault: 25 MW/100 MWh seharga 7,7 juta dolar AS, atau 77 dolar AS/kWh. Efisiensi 75–85% dan umur 30–40 tahun.
Penyimpanan hidro pompa dan hidro skala kecil pada Kanal Induk Hidrotermal	80–150 dolar AS/kWh	Memanfaatkan beda tinggi alami di sepanjang jalur.
BESS ion litium	125 dolar AS/kWh, terpasang lengkap	Menurut Ember (2025): 75 dolar AS/kWh untuk peralatan Tiongkok ditambah 50 dolar AS/kWh untuk pemasangan. Pada skala 215 GWh, biayanya dapat turun menjadi 100 dolar AS/kWh.

Kapasitas primer total 360 GWh, setara satu siklus percepatan penuh. Dengan 70% penyimpanan gravitasi/hidro pompa dan 30% BESS, biayanya:

Komponen	Kapasitas	Biaya satuan	Biaya
Gravitasi + hidro pompa	250 GWh	60 dolar AS/kWh	15 miliar dolar AS
BESS	110 GWh	125 dolar AS/kWh	13,75 miliar dolar AS
Total tingkat primer	360 GWh		28,75 miliar dolar AS

Rentang termasuk ketidakpastian: 22–35 miliar dolar AS.

9.5.2. Tingkat sekunder: penyangga di dekat kumparan dan di terowongan

Roda gila di dekat kumparan meredam transien. Biaya satuan 0,5–1 juta dolar AS/MWh; penyangga 1–5 GWh menelan 0,5–5 miliar dolar AS.

9.5.3. Tingkat impuls: stabilisasi dalam mikrodetik

Superkapasitor hanya mengimbangi impuls beberapa mikrodetik dan menstabilkan tegangan saat beban berubah mendadak. Kapasitas total kurang dari 1% energi peluncuran, yakni 1–3 GWh. Pada 300–500 dolar AS/kWh, biayanya 0,3–1,5 miliar dolar AS.

9.5.4. Total biaya penyimpanan

Tingkat	Teknologi	Kapasitas	Biaya (miliar USD)
Primer	Gravitasi + hidro pompa + BESS	360 GWh	\$22–35
Penyangga	Roda gila	1–5 GWh	\$0.5–5
Impuls	Superkapasitor	1–3 GWh	\$0.3–1.5
Total penyimpanan			\$22.8–41.5

9.6. Pusat industri dan logistik

Pos biaya	Biaya (miliar USD)	Dasar perkiraan
Pusat industri Gabon: pembuatan pesawat ulang-alik dan modul peluncuran	\$3–6	Galangan kapal, pabrik, dan derek
Pusat industri Republik Demokratik Kongo: portal atmosfer dan modul berkecepatan tinggi	\$2–4	Pusat industri pegunungan dan sistem elektrolisis
Pengembangan pelabuhan di Gabon dan Danau Tanganyika	\$1–3	Dermaga, derek, dan gudang
Jaringan listrik dan jalan sepanjang 2.050 km	\$4–8	Jalur 220 kV, jalan, dan jembatan
Kanal Induk Hidrotermal	\$2–5	Pekerjaan tanah, pelapis, dan pintu air
Total	\$12–26	

9.7. Litbang dan purwarupa — Fase 0

Pos biaya	Rentang (miliar USD)	Dasar perkiraan
Pemodelan matematis dan CFD	\$0.01–0.03	Acuan: pengembangan kembaran digital hyperloop, 4,5 juta CHF.
Survei geologi jalur 2.050 km	\$0.015–0.025	7.000–12.000 dolar AS/km untuk survei terperinci di daerah sulit dijangkau.
Perancangan dan dokumentasi BIM	\$0.02–0.05	Spesifikasi, desain awal, dan desain pelaksanaan.
Fasilitas uji portal dan superkonduktor	\$0.01–0.03	Bangku uji ruang portal purwarupa dan modul levitasi.
Pembentukan konsorsium dan perjanjian hukum	\$0.005–0.015	Perundingan internasional, pendaftaran, dan asuransi.
Total Fase 0	\$0.06–0.15	

Anggaran litbang 0,06–0,15 miliar dolar AS tidak tetap. Kajian mendalam, purwarupa portal ukuran penuh, atau bangku uji skala besar dapat menaikkannya menjadi 0,5–3 miliar. Karena itu ringkasan CAPEX memakai rentang 0,1–3 miliar dengan median 1,5 miliar dolar AS.

9.8. Ringkasan akhir CAPEX

Pos biaya	Rentang (miliar USD)	Median (miliar USD)	Porsi CAPEX (%)
Penggalian terowongan	\$77.4–124.8	\$101.1	41%
Armada dan produksi mesin bor	\$2.64–4.84	\$3.74	1.5%
Sistem panas bumi otonom: 40 pembangkit berdaya 2,5 GW	\$80–120	\$100	40%
Penyimpanan tiga tingkat	\$22.8–41.5	\$32.2	13%
Pusat industri dan logistik	\$12–26	\$19	8%
Litbang, perizinan, dan administrasi	\$0,1–3	\$1.5	0.6%

Pos biaya	Rentang (miliar USD)	Median (miliar USD)	Porsi CAPEX (%)
Cadangan kontinjensi (15%)	\$31–49	\$40	16%
TOTAL CAPEX	\$225–365	\$295	100%

Kesimpulan utama: estimasi median biaya StarRoad sekitar 300 miliar dolar AS.

9.9. Pembagian per fase (miliar USD)

Pos biaya	Fase 0	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
Penggalian terowongan	—	—	\$5	\$20	\$70	\$6
Mesin bor terowongan	—	\$2	\$0.7	\$0.8	\$0.2	\$0.1
Sistem energi termal geotermal mandiri	—	\$60	\$20	\$20	—	—
Penyimpanan	—	\$10	\$10	\$8	\$3	\$1
Pusat industri + logistik	—	\$5	\$3	\$3	\$5	\$3
Litbang dan perizinan	\$1.5	\$0.2	\$0.1	\$0.1	\$0.05	\$0.05
Cadangan (15%)	\$0.23	\$11.6	\$5.8	\$7.8	\$11.7	\$1.5
TOTAL per fase	\$1.73	\$88.8	\$44.6	\$59.7	\$90	\$11.7
Total kumulatif	\$1.73	\$90.5	\$135.1	\$194.8	\$284.8	\$296.5

9.10. Pengembalian investasi dan perkembangan biaya angkut

Semua data dalam subbagian ini sepenuhnya teoretis.

9.10.1. Perkembangan frekuensi peluncuran dan biaya per kilogram

StarRoad tidak langsung mencapai kapasitas penuh. Frekuensi dan biaya angkut berubah seiring pembukaan jalur baru, pertumbuhan armada, dan pembangunan infrastruktur orbit.

Model biaya ke orbit geostasioner dan lebih jauh, dolar AS/kg:

Periode	Jalur	Peluncuran per tahun	Frekuensi	Biaya angkut (\$/kg)	Keterangan
Tahun 1–2, perintis	1	12–24	1–2 per bulan	\$80–120	Peluncuran komersial pertama. Penyempurnaan operasi, biaya tidak langsung tinggi, dan produksi kecil.
Tahun 3–5	1	50–100	1–2 per minggu	\$30–50	Operasi seri dimulai. Armada bertambah menjadi 3–5 pesawat dan skala ekonomi menurunkan biaya.
Tahun 6–10	1	200–300	sekitar 1 per hari	\$10–20	Jalur pertama mencapai kapasitas rancangan dan perawatan sepenuhnya otomatis.
Tahun 11–15	2	500–700	sekitar 2 per hari	\$3–8	Jalur kedua beroperasi; biaya tetap dibagi antara dua akselerator.
Tahun 16–25	3–4	1000+	3–5 per hari	\$0.8–3	Diperluas menjadi 3–4 jalur paralel. Pembangkit surya antariksa di atas 1 GW menyediakan energi orbit untuk manuver dan pengolahan kargo.
Tahun 26+	5+	1500+	5–10 per hari	\$0.3–1	Infrastruktur matang. Pembangkit antariksa memasok akselerator dan pabrik orbit; biaya marginal energi hampir nol.

9.10.2. Perhitungan biaya satu peluncuran (\$/kg)

Rumus tiap periode: $C_{kg} = (C_{energi} + C_{perawatan} + C_{penyusutan} + C_{operasi}) / M_{muatan}$, dengan:

- Cenergi mencakup listrik, pendinginan, dan sistem bantu.
- Cperawatan mencakup perawatan pesawat dan infrastruktur.
- Cpenyusutan adalah penyusutan CAPEX 300 miliar dolar AS selama 50 tahun.
- Coperasi mencakup personel, logistik, asuransi, dan biaya operasi lain.
- Mmuatan adalah massa muatan per peluncuran: 10.000 t.

Parameter akhir tiap periode:

Periode	Peluncuran/tahun	Energi (\$/kg)	Perawatan (\$/kg)	Penyusutan (\$/kg)	Operasi (\$/kg)	Biaya total (\$/kg)
Tahun 1–2	12	1.8	6.63	50	3.57	62

Periode	Peluncuran/tahun	Energi (\$/kg)	Perawatan (\$/kg)	Penyusutan (\$/kg)	Operasi (\$/kg)	Biaya total (\$/kg)
Tahun 3–5	50	1	1.25	12	0.67	14.92
Tahun 6–10	250	0.36	0.23	2.4	0.13	3.12
Tahun 11–15, 2 jalur	600	0.12	0.113	1	0.061	1.29
Tahun 16–25, 3–4 jalur	1200	0.045	0.049	0.5	0.026	0.62
Tahun 26+, 5+ jalur dan tenaga surya antariksa	2000	0.015	0.015	0.3	0.008	0.34

9.10.3. Struktur biaya peluncuran dalam nilai mutlak

Untuk tahun rata-rata dalam tiap periode, dengan muatan 10.000 t:

Periode	Jumlah peluncuran	Energi per peluncuran (juta USD)	Perawatan (juta USD)	Penyusutan (juta USD)	Biaya operasi (juta USD)	Total per peluncuran (juta USD)
Tahun 1–2	12	18	66.3	500	35.7	620
Tahun 3–5	50	10	12.5	120	6.7	149.2
Tahun 6–10	250	3.6	2.34	24	1.26	31.2
Tahun 11–15	600	1.2	1.13	10	0.61	12.93
Tahun 16–25	1200	0.45	0.49	5	0.26	6.2
Tahun 26+	>2000	0.15	0.146	3	0.079	3.38

9.10.4. Asumsi utama perhitungan

- Energi:** harga awal 0,05 dolar AS/kWh; pada tahun 26+ turun menjadi 0,005 dolar AS/kWh berkat pembangkit surya antariksa dan kapasitas panas bumi sendiri.
- Perawatan: tinggi saat** perintis karena perbaikan, penyempurnaan, dan kelebihan personel; pada tahun ke-10 berubah menjadi perawatan lini otomatis.
- Penyusutan:** CAPEX 300 miliar dolar AS selama 50 tahun sama dengan 6 miliar per tahun. Dengan 250 peluncuran setahun, nilainya 24 juta per peluncuran. Ini estimasi konservatif tanpa mengimbangi pendapatan lain. Atau, pemulihan 6 miliar per tahun dapat menjadi arus investasi yang tumbuh untuk cabang StarRoad baru.
- Pembangkit surya antariksa: mulai** tahun ke-16 memasok pabrik orbit dan sebagian akselerator, menekan biaya energi, dan melipatgandakan pendapatan penjualan energi.

9.10.5. Dinamika terpadu: pendapatan dan biaya

Periode	Peluncuran/tahun	Harga pasar rata-rata (\$/kg)	Pendapatan peluncuran (miliar USD/tahun)	Biaya (miliar USD/tahun)	Laba kotor (miliar USD/tahun)
Tahun 1–2	12	\$100	12	7.44	4.56
Tahun 3–5	50	\$39	19.5	7.45	12.04
Tahun 6–10	250	\$9.6	24	7.8	16.2
Tahun 11–15	600	\$3.9	23.4	7.76	15.64
Tahun 16–25	1200	\$1.6	19.2	7.44	11.76
Tahun 26+	2000	\$0.5	10	6.75	3.25

Catatan: pendapatan 35–44 miliar dolar AS per tahun dari penjualan energi panas bumi tidak dicantumkan. Arus terpisah ini menutup penyusutan dan biaya operasi infrastruktur.

9.10.6. Kesimpulan perkembangan biaya

StarRoad bermula pada 80–120 dolar AS/kg ke orbit geostasioner dan lebih jauh: sudah 10–15 kali lebih murah daripada Falcon Heavy ke orbit rendah pada 1.400 dolar AS/kg dan sebanding dengan sasaran Starship 200 dolar AS/kg. Pada tahun ke-10 turun menjadi 10 dolar AS/kg, tahun ke-25 menjadi 1 dolar AS/kg, dan sekitar tahun ke-30 menjadi di bawah 0,5 dolar AS/kg dengan 5+ jalur dan tenaga surya antariksa. Energi surya dan logam asteroid pun menjadi layak bagi industri Bumi.

Kesimpulan utama: StarRoad kompetitif bahkan pada tahap perintis. Peningkatan skala dan sinergi tenaga surya antariksa menurunkan harga dua orde besaran dalam 30 tahun.

9.11. Perbandingan dengan alternatif

Proyek	Jenis	Investasi (CAPEX / litbang)	Masa pengembalian	Biaya / LCOE	Catatan
StarRoad, komponen energi: panas bumi + penyimpanan	Energi	100–150 miliar dolar AS	5–7 tahun dari penjualan energi	0,05 dolar AS/kWh	Hanya pembangkitan panas bumi dan penyimpanan. Balik modal sebagai proyek energi mandiri.
StarRoad, komponen transportasi: terowongan, portal, dan pesawat	Transportasi	150–200 miliar dolar AS	8–12 tahun termasuk pendapatan kargo	1–10 dolar AS/kg	Akselerator, portal, dan pesawat. Balik modal melalui angkutan dengan energi dari komponen pertama.
StarRoad, seluruh sistem	Energi + transportasi	sekitar 300 miliar dolar AS	8–12 tahun dari pendapatan gabungan	0,05 dolar AS/kWh dan 1–10 dolar AS/kg	Proyek terpadu dengan pendapatar energi dan kargo.
Falcon Heavy, pengembangan	Transportasi	sekitar 5 miliar dolar AS untuk litbang	sekitar 10–15 tahun pada frekuensi komersial	sekitar 1.400 dolar AS/kg	Roket yang sudah ada. CAPEX di sini adalah pengembangan, bukan infrastruktur.
Starship, pengembangan	Transportasi	sekitar 10 miliar dolar AS untuk litbang	sekitar 10–15 tahun jika pasar sasaran tercapai	sasaran 200 dolar AS/kg; potensi 50–100 dolar AS/kg	Dalam pengembangan. Investasi untuk litbang, bukan infrastruktur tetap.
Grand Inga, PLTA di Republik Demokratik Kongo	Energi	80–100 miliar dolar AS	15–25 tahun	0,03–0,05 dolar AS/kWh	Pembangkit listrik tenaga air besar; hanya energi.
PLTN besar, 2 unit sekitar 2,4 GW	Energi	15–20 miliar dolar AS	20–30 tahun	0,05–0,08 dolar AS/kWh	PLTN tipikal; hanya energi.

9.12. Kesimpulan ekonomi

Model ini menunjukkan StarRoad layak diwujudkan dengan median CAPEX sekitar 300 miliar dolar AS. Faktor utama:

- 1. **Sistem panas bumi** senilai 80–120 miliar dolar AS adalah komponen termahal, tetapi balik modal sebagai proyek energi mandiri dalam 5–7 tahun.
- 2. **Penggalian** senilai 77–125 miliar dolar AS layak secara teknis dengan mesin bor seri dan produksi sendiri.
- 3. **Penyimpanan** senilai 23–42 miliar dolar AS bertumpu pada turunnya harga BESS menjadi 125 dolar AS/kWh dan sistem gravitasi berdasarkan praktik terbaik dunia.
- 4. **Litbang** senilai 0,1–3 miliar dolar AS mencerminkan biaya purwarupa nyata, bukan konstruksi skala penuh.

Daya tarik ekonomi: pada 0,05 dolar AS/kWh, StarRoad menghasilkan 35–44 miliar dolar AS per tahun hanya dari energi. Ini menutup biaya operasi dan mengembalikan modal lewat ekspor energi sebelum peluncuran antariksa berskala penuh.

10. Keselamatan dan mode operasi darurat

StarRoad dirancang berdasarkan paradigma **ekstrem untuk tetap beroperasi saat terjadi kegagalan**, sehingga kegagalan satu komponen — dan sering kali beberapa komponen — tidak menimbulkan bencana. Keselamatan diberikan **oleh redundansi fisik, pemisahan fungsi, dan protokol berlapis yang mencakup** seluruh siklus dari persiapan hingga penerbangan.

10.1. Filosofi keselamatan: tidak ada satu kegagalan pun yang boleh berakibat fatal

- o **Redundansi pada sistem kritis.** Unsur utama—reaktor di dalam wahana, catu daya segmen akselerator, dan cincin jet pada portal—memiliki tiga atau empat unit cadangan yang independen.
- o **Segmentasi dan isolasi.** Terowongan dibagi menjadi segmen otonom sepanjang 50–200 km, masing-masing dengan catu daya dan sistem vakum **sendiri serta pintu mekanis darurat** di antara segmen. Jika segmen di sebelahnya kehilangan vakum, pintunya **hanya ditutup saat tidak ada wahana di dalamnya** sehingga kegagalan tidak merambat.
- o **Kendali levitasi aktif dan pasif.** Sistem utama untuk stabilisasi dan kompensasi ketidakseimbangan **berada di dalam** wahana. Loop superkonduktor berukuran besar dan unit daya internal mendistribusikan ulang energi dalam hitungan mikrodetik untuk melawan kegagalan setempat pada sistem darat. Di tikungan hipersonik, penampang elips wahana dan gaya sentrifugal semakin menstabilkannya terhadap permukaan pemandu.
- o **Wahana dan awak didahulukan.** Jika keadaan darurat terjadi saat peluncuran, protokol memprioritaskan penyelamatan wahana meskipun sebagian kecil infrastruktur terowongan harus rusak.

10.2. Risiko utama dan perlindungannya

Risiko	Penyebab	Perlindungan dan protokol
Hilangnya levitasi atau ketidaksimetrisan medan pada kecepatan hipersonik	Kegagalan segmen daya atau kerusakan kumparan.	1. Stabilisasi internal dengan respons nanodetik. 2. Pengereman induktif: pada kecepatan hipersonik, wahana menginduksi arus pada kumparan pasif terowongan dan menghasilkan efek penstabil. 3. Segmentasi membatasi tumbukan dan kerusakan pada satu segmen.
Kegagalan penghalang gas-dinamis pada portal	Kegagalan satu atau beberapa cincin jet.	1. Sistem redundan dengan tiga cincin , masing-masing dilindungi selubung tahan ledakan . 2. Pengujian 60 detik sebelum peluncuran membentuk kerucut gas tanpa membuka penutup utama; cincin yang rusak diisolasi. 3. Alarm -1 membatalkan peluncuran jika ditemukan kesalahan apa pun.
Hilangnya vakum terowongan	Kenaikan tekanan akibat kecelakaan atau kerusakan.	1. Jaringan sensor tekanan di sepanjang terowongan . 2. Pintu darurat antarsemen untuk membatasi kegagalan. 3. Protokol penghentian darurat otomatis—Alarm-1 atau Alarm-2 —jika kenaikan tekanan terdeteksi di depan wahana.
Kegagalan ditemukan setelah wahana tidak mungkin lagi berhenti	Kesalahan kritis terdeteksi pada 60–100% bagian akhir lintasan akselerasi.	Alarm-3: pengereman maksimum hingga 8g menurunkan kecepatan. Wahana diprioritaskan untuk memasuki lintasan suborbital meskipun portal hilang . Muatan dilepaskan untuk meringankan wahana agar kemudian dapat mendarat dengan aman di laut.

10.3. Jenjang protokol darurat

- **Alarm-1, keadaan darurat sebelum peluncuran.** Diaktifkan **sebelum wahana** bergerak jika sistem mendeteksi hilangnya vakum, gangguan medan magnet, kegagalan salah satu cincin portal, atau pembentukan kerucut gas yang tidak normal. **Tindakan:** segera batalkan peluncuran, isolasi segmen terowongan yang rusak dengan pintu, lalu lakukan diagnosis dan perbaikan.
- **Alarm-2, keadaan darurat pada awal atau pertengahan rute, 0–60%.** Diaktifkan **setelah** keberangkatan bila gangguan terdeteksi lebih jauh **di** lintasan. Tindakan: pengereman darurat dan berhenti di dalam terowongan. Jika gangguan berada di depan, wahana kembali ke titik awal dengan tenaganya sendiri. Jika tidak, setelah berhenti wahana diisolasi oleh pintu pada segmennya; segmen diisi udara dan awak serta penumpang dievakuasi melalui **terowongan servis dan poros** menuju permukaan.
- **Alarm-3, keadaan darurat pada akhir rute, 60–100%.** Diaktifkan ketika wahana tidak mungkin berhenti di dalam terowongan dan portal atau segmen akhir diperkirakan gagal. **Tindakannya:**
 - 1) **Pengereman darurat maksimum hingga 8g** untuk menurunkan kecepatan.
 - 2) **Utamakan keutuhan wahana; portal** tetap terbuka.
 - 3) **Masuk ke lintasan suborbital darurat** dan lepaskan muatan di titik puncak agar wahana lebih ringan.
 - 4) **Mendarat di wilayah** yang telah ditentukan di Samudra Hindia atau Pasifik menggunakan seluruh sistem utama dan cadangan. Struktur wahana dirancang untuk menahan beban berlebih dan kerusakan sebagian portal.

10.4. Langkah struktural untuk mempertahankan keselamatan

- **Wahana.** Dua reaktor internal yang independen pada versi lebih panjang di masa depan; sistem levitasi superkonduktor terdistribusi; serta badan yang diperkuat untuk menahan beban ekstrem dan kejutan termal.
- **Portal atmosfer** dataran tinggi. Tiga mesin jet berbentuk cincin yang independen berada dalam rumah tahan ledakan. Penutup mekanis mampu menahan gelombang kejut dari penghalang gas yang terganggu sebagian. Bukaan berbentuk corong pada dinding dalam portal segera menurunkan tekanan dan secara pasif membuang gas ke ruang vakum cadangan. Bukaan ini meminimalkan masuknya gas atmosfer ke terowongan maupun portal, membatasi kerusakan bahkan setelah seluruh sistem portal gagal, dan mencegah pulsa tekanan wahana hipersonik merobek struktur.

- o **Terowongan.** Segmentasi, pintu darurat, sistem daya ganda, serta terowongan servis teknis untuk evakuasi dan perbaikan darurat.

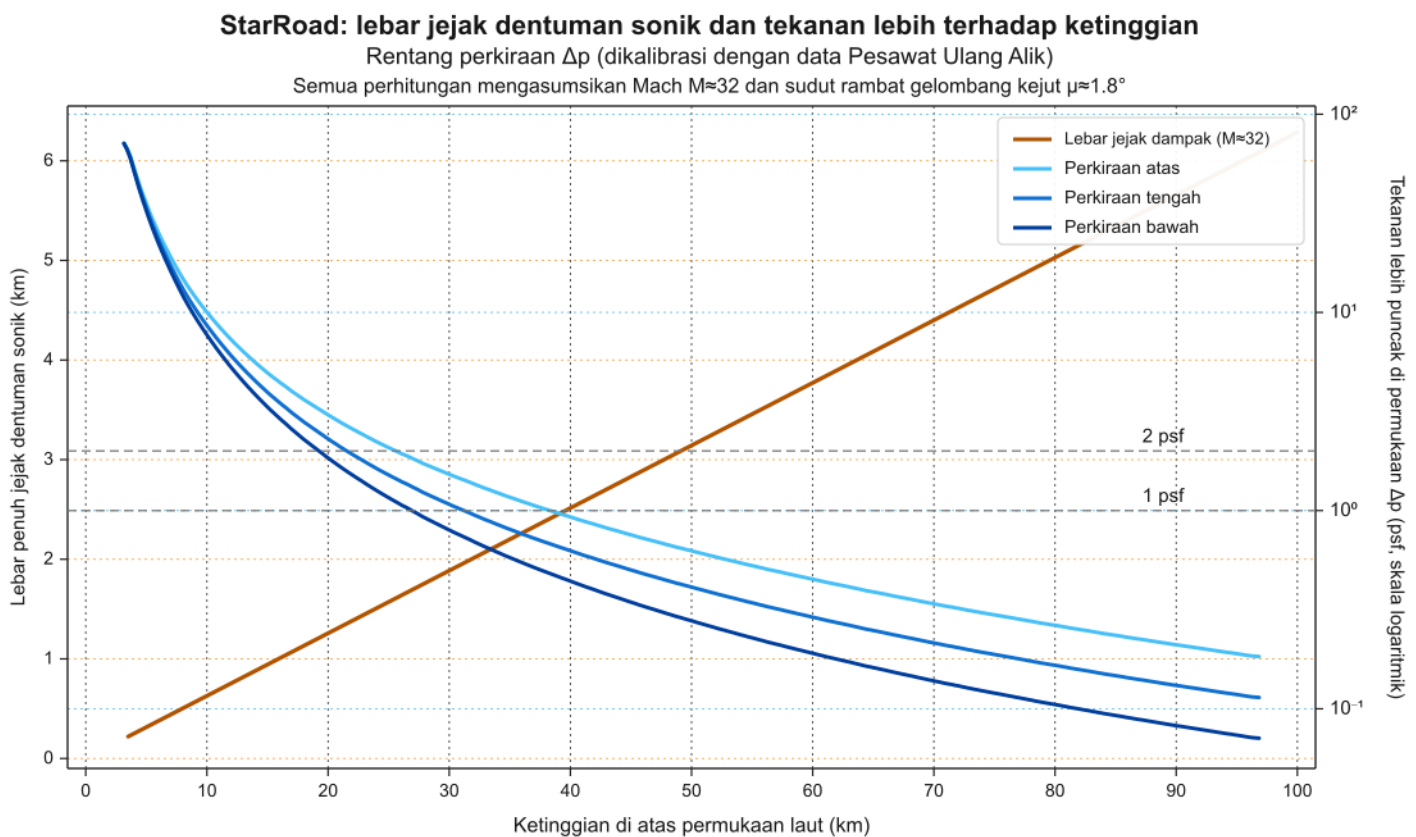
10.5. Dampak akustik dan gelombang kejut

Wahana yang keluar pada kecepatan hipersonik menghasilkan ledakan sonik kuat berbentuk gelombang N. Sebagian besar energi gelombang merambat dalam pita sempit sepanjang lintasan, sehingga dampak terhadap infrastruktur darat di dekat portal berkurang. Meskipun demikian, zona perlindungan sanitasi tertutup ditetapkan di sekelilingnya; radiusnya ditentukan melalui pemodelan dan dikukuhkan melalui uji skala penuh.

Dua ambang tekanan berlebih puncak, Δp , menentukan paparan permukaan yang dapat diterima:

$\Delta p \leq 2$ psf, sekitar 96 Pa: kerusakan pada bangunan dan kaca dinilai tidak mungkin terjadi.

$\Delta p \leq 1$ psf, sekitar 48 Pa: sasaran untuk wilayah berpenghuni, dengan risiko keluhan minimal dan tanpa kerusakan. Rancangan rute dan batas operasi—koridor terlarang, jendela cuaca, dan pembatasan ketinggian—dipilih dengan margin yang cukup untuk menjamin kedua ambang tersebut.



Kesimpulan: keselamatan StarRoad tidak didasarkan pada keyakinan bahwa kegagalan **mustahil terjadi**. Setiap jenis kegagalan dianggap mungkin dan diberi respons otomatis yang telah ditentukan. Inilah yang mengubah gagasan tersebut dari rute hipotetis menjadi sistem rekayasa yang disengaja, andal, dan terutama dapat dipercaya.

11. Dampak budaya dan psikologis

Selain dampak teknologi dan ekonomi, StarRoad akan sangat memengaruhi budaya dan kesadaran kolektif umat manusia. Setiap peluncuran akan berubah dari operasi teknis menjadi peristiwa **publik yang besar dan nyaris sakral**.

11.1. Tontonan sebagai fenomena

Keluarnya wahana pada kecepatan hipersonik akan menciptakan fenomena astronomi buatan manusia yang unik: Panah Surya. Bagi pengamat di daerah aman, fenomena itu tampak sebagai kilatan seketika di cakrawala, diikuti kenaikan cepat jejak plasma menyilaukan yang menggambar garis lurus di langit. Puluhan detik kemudian, bukan deru mesin yang biasa, melainkan ledakan sonik ganda yang mengguncang akan tiba — sensasi fisik dari seluruh kota terbang, bukan sekadar mesin, yang menembus penghalang bunyi dan panas. Peluncuran malam akan menerangi bentang alam seperti komet bergerak dan menyerupai aurora teknologi yang tidak alami.

11.2. Resonansi psikologis dan simbolis

- **Skala nyata. Program** antariksa yang abstrak menjadi tontonan harian atau mingguan yang terlihat dari jarak ratusan kilometer, mengubah perluasan antariksa dari sekumpulan bagan menjadi kenyataan **fisik dalam** kehidupan.
- **Arketipe baru.** Citra panah cahaya raksasa yang ditembakkan Bumi ke antariksa menjadi arketipe kuat bagi kemajuan, tekad, dan cita-cita. Dalam budaya populer, citra ini menggantikan roket vertikal kuno dan melambangkan peralihan ke era **koridor transportasi** antariksa.
- **Persatuan dan kebanggaan.** Seperti peluncuran Soyuz dan Apollo yang dahulu menyatukan dunia di depan layar televisi, penerbangan rutin StarRoad menjadi peristiwa media global yang menunjukkan kemampuan umat manusia bekerja sama demi sasaran besar.

11.3. Konsekuensi sosial-ekonomi

- **Pariwisata. Kompleks pengamatan** yang dibangun khusus di batas aman zona terlarang menjadi pusat bentuk baru wisata antariksa. Menyaksikan peluncuran dapat menandingi daya tarik mengunjungi keajaiban dunia kuno.
- **Dorongan pendidikan. Tontonan** itu menjadi sarana inspirasi karier yang tiada banding, mendorong jutaan anak mempelajari fisika, teknik, dan astronautika.
- **Menghilangkan kesan misterius** antariksa. Sifat peluncuran yang rutin, dapat diprediksi, dan industrial menghapus aura keistimewaan dan risiko maut dari penerbangan antariksa, lalu menampilkannya **sebagai operasi logistik yang normal meskipun sangat besar**.

Karena itu, StarRoad tidak hanya akan menciptakan infrastruktur fisik untuk mencapai antariksa, tetapi **juga narasi budaya dan landasan emosional yang dibutuhkan** umat manusia untuk menerima peran barunya: peradaban yang secara aktif membangun masa depan di luar buaian. Kemunculan rutin Panah Surya akan menjadi pengingat harian bahwa jalan menuju bintang-bintang bukan hanya terbuka, tetapi sudah digunakan.

12. Kesimpulan

StarRoad lebih dari sekadar megaprojek rekayasa. StarRoad adalah strategi peralihan menuju peradaban antariksa industri. Dengan beralih dari paradigma “roket” ke paradigma “koridor”, proyek ini menawarkan cara untuk mengatasi dua hambatan utama: biaya pengiriman muatan dan rendahnya kapasitas angkut.

Koridor hipersonik menjadi tulang punggung yang menghubungkan energi, pertanian, industri, logistik, dan teknologi antariksa. Afrika juga memperoleh peluang melakukan lompatan industri dan teknologi dengan memanfaatkan geografi dan sumber dayanya untuk membangun jalan menuju antariksa, alih-alih sekadar mengeksplor bahan mentah.

Dengan mengintegrasikan dan meningkatkan skala teknologi yang telah terbukti, StarRoad meletakkan landasan bagi ekonomi yang membuat sumber daya Tata Surya dapat digunakan untuk mengatasi masalah di Bumi, sementara infrastrukturnya sendiri menjadi perlindungan sekaligus batu loncatan bagi masa depan umat manusia. Perwujudannya akan menuntut kerja sama internasional yang belum pernah terjadi, investasi jangka panjang, dan tekad rekayasa; imbalannya adalah kunci menuju era antariksa sejati, sumber daya luar Bumi yang nyaris tak terbatas, dan energi yang berlimpah.