

Naik, Terbang, Orbit

Kapal Udara Elektroaerodinamika Bertenaga Surya untuk Akses Berkelanjutan ke Luar Angkasa

Visi dan Dasar Fisika

Mimpi terbang selalu menjadi persaingan antara kesabaran dan kekuatan. Pelaut balon awal abad ke-18 naik perlahan ke langit menggunakan gas mengambang, sementara insinyur roket abad ke-20 merobeknya dengan api. Kedua pendekatan berbagi tujuan yang sama – melarikan diri dari tirani gravitasi – tetapi berbeda secara radikal dalam filsafat. Satu menggunakan udara sebagai mitra; yang lain memperlakukannya sebagai rintangan. Di antara dua ekstrem itu terletak jalan ketiga, yang belum terealisasi dalam praktik tetapi tidak lagi mustahil secara prinsip: **kapal udara bertenaga surya yang dapat terbang ke orbit**, naik pertama kali dengan mengambang, kemudian dengan angkat aerodinamis, dan akhirnya dengan dukungan sentrifugal, semuanya tanpa propelan kimia.

Di jantung konsep ini adalah **propulsi elektroaerodinamika (EAD)** – bentuk dorongan listrik yang menggunakan medan listrik untuk mempercepat ion di udara. Ion yang dipercepat mentransfer momentum ke molekul netral, menghasilkan aliran massal dan dorongan bersih pada elektroda. Berbeda dengan roket yang harus membawa massa reaksi, atau baling-baling yang membutuhkan bilah bergerak, propulsi elektroaerodinamika beroperasi **tanpa bagian bergerak dan tanpa knalpot di kapal**, hanya sinar matahari dan udara. Ketika dikaitkan dengan array surya ber-efisiensi tinggi dan dipasang pada badan pengangkat besar dan ultraketat, ia menyediakan bahan yang hilang untuk percepatan berkelanjutan di atmosfer atas, di mana drag rendah tetapi udara masih ada.

Proposal ini sederhana untuk dijelaskan tetapi menantang untuk dieksekusi:

1. **Naik** – Kapal udara mengambang yang diisi hidrogen atau helium naik secara pasif ke stratosfer, jauh dari cuaca dan lalu lintas penerbangan.
2. **Terbang** – Kapal udara mempercepat secara horizontal menggunakan dorongan EAD, secara perlahan meningkatkan kecepatan sambil naik ke udara yang lebih tipis untuk mengurangi drag.
3. **Orbit** – Setelah minggu-minggu percepatan berkelanjutan, gaya sentrifugal menyeimbangkan gravitasi; kendaraan tidak lagi membutuhkan angkat, menjadi satelit melalui ketekunan daripada ledakan.

Ide ini bukan fantasi. Setiap langkah berakar pada fisika yang dikenal: mengambang, tenaga surya, elektrostatika, dan mekanika orbit. Yang berubah adalah skala waktu. Alih-alih menit pembakaran, kita mempertimbangkan **minggu sinar matahari**. Alih-alih ton propelan, kita bergantung pada **medan dan kesabaran**.

Energi Orbit

Setiap diskusi tentang penerbangan luar angkasa dimulai dan diakhiri dengan energi. Energi kinetik per kilogram massa yang diperlukan untuk mempertahankan orbit melingkar di sekitar Bumi diberikan oleh

$$E_k = \frac{1}{2} v^2$$

di mana v adalah kecepatan orbit. Untuk orbit rendah Bumi, $v \approx 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$, sehingga $E_k \approx 3.0 \times 10^7 \text{ J/kg}$, atau sekitar **30 megajoule per kilogram**. Itu setara dengan energi pembakaran sekitar satu kilogram bensin untuk setiap kilogram yang ditempatkan di orbit. Itu angka besar, tapi tidak astronomis.

Sekarang bandingkan itu dengan fluks surya kontinu di puncak atmosfer Bumi: sekitar **1.360 watt per meter persegi**. Jika kita bisa mengonversi bahkan pecahan kecil darinya menjadi energi kinetik selama hari atau minggu, kita bisa, secara prinsip, menyediakan energi orbit yang diperlukan. Array fotovoltaik berkinerja tinggi modern memiliki daya spesifik dalam orde ratusan watt per kilogram. Pada $P_{sp} = 300 \text{ W/kg}$, satu kilogram array menghasilkan 300 joule per detik. Selama sehari (8.64×10^4 detik), itu 2.6×10^7 joule – sebanding dengan energi orbit satu kilogram massa.

Perbandingan sederhana ini menunjukkan logika pendekatan ini. Energi untuk orbit tersedia dari Matahari dalam sekitar **satu hari per kilogram array**, jika dapat diubah secara efisien menjadi dorongan. Tantangan praktisnya adalah bahwa drag dan inefisiensi menyerap sebagian besarnya. Solusinya adalah ketinggian dan kesabaran: bekerja di udara tipis di mana drag rendah, dan meregangkan proses selama minggu daripada jam.

Menukar Waktu dengan Propelan

Roket menyelesaikan masalah drag dengan kekuatan kasar – mereka pergi begitu cepat sehingga udara tidak relevan. Kapal udara, sebaliknya, bekerja dengan udara; mereka bisa berlama-lama. Jika waktu diperlakukan sebagai sumber daya yang dapat dibuang, itu bisa mengantikan massa propelan. Tugas kapal udara adalah mempertahankan percepatan kecil tapi persisten selama periode panjang, mungkin **dalam orde 10^{-3} m/s^2** , hingga kecepatan orbit tercapai.

Jika pendakian ke orbit memakan waktu tiga minggu, atau sekitar 1.8×10^6 detik, percepatan rata-rata yang diperlukan adalah

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{t} = \frac{7.8 \times 10^3}{1.8 \times 10^6} \approx 4.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

– kurang dari setengah seribu gravitasi Bumi. Percepatan seperti itu mudah ditoleransi untuk kapal udara; mereka tidak menimbulkan ketegangan struktural. Satu-satunya kesulitan adalah **mempertahankannya**, mengingat jumlah dorongan yang tersedia per unit daya yang kecil.

Jika kendaraan memiliki massa 10^3 kg , percepatan rata-rata $4 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ hanya memerlukan sekitar **4 newton dorongan bersih** – kurang dari berat apel. Absurditas

nyata mencapai orbit dengan dorongan apel menghilang ketika waktu diizinkan untuk meregang ke minggu.

Mengambang dan Jalan ke Udara Tipis

Kapal udara memulai perjalannya seperti alat apa pun yang lebih ringan dari udara: dengan menggusur udara dengan gas yang lebih ringan. Gaya mengambang diberikan oleh

$$F_b = (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{gas}})gV$$

di mana V adalah volume gas dan ρ adalah kepadatan masing-masing. Dekat permukaan laut, $\rho_{\text{air}} \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{He}} \approx 0.18 \text{ kg/m}^3$, dan $\rho_{\text{H}_2} \approx 0.09 \text{ kg/m}^3$. Hidrogen menyediakan sedikit lebih banyak angkat, sekitar **1,1 kg per meter kubik**, dibandingkan **1,0 kg per meter kubik** untuk helium. Perbedaannya tampak kecil tapi menumpuk selama ribuan meter kubik.

Hidrogen dengan demikian menawarkan keunggulan kinerja yang terukur, meskipun dengan biaya kemudahan terbakar. Ia memerlukan zonasi listrik yang ketat dan protokol ventilasi, terutama karena kendaraan juga membawa sistem elektrostatik tegangan tinggi. Helium menawarkan angkat lebih rendah tapi inersia lengkap. Kedua gas layak; pilihan tergantung pada toleransi risiko misi. Untuk tes awal publik atau area berpenduduk, helium lebih disukai. Untuk upaya terpencil atau orbit, hidrogen mungkin dibenarkan.

Saat kendaraan naik, kepadatan udara turun secara eksponensial kasar dengan tinggi skala **$H \approx 7.5 \text{ km}$** . Pada 30 km, kepadatan sekitar **1/65** permukaan laut; pada 50 km **1/300**. Mengambang melemah secara proporsional, tapi begitu juga drag. Perangkat dirancang untuk mencapai **mengambang netral** pada ketinggian di mana intensitas surya tetap tinggi tapi tekanan dinamis minimal – sekitar 30–40 km di stratosfer. Dari sana, percepatan horizontal dimulai.

Angkat, Drag, dan Tekanan Dinamis

Untuk mempertahankan ketinggian saat mempercepat, kapal udara mungkin bergantung sebagian pada **angkat aerodinamis**. Untuk badan pengangkat, gaya angkat dan drag adalah

$$F_L = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_L, \quad F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 A C_D$$

di mana A adalah area referensi, C_L dan C_D koefisien angkat dan drag. Karena ρ kecil pada ketinggian, gaya ini kecil; kendaraan mengkompensasi dengan **area besar** dan **berat rendah**.

Rasio $L/D = C_L/C_D$ menetapkan efisiensi penerbangan aerodinamis. Glider modern dapat melebihi **$L/D = 50$** di udara padat. Kapal udara ultraketat yang dirancang dengan kehalusan ekstrem dan tambahan minimal bisa mempertahankan **L/D** efektif 10–20 bahkan di udara tipis. Tapi saat udara semakin tipis, transisi ke penerbangan orbit tidak dibatasi oleh angkat – itu diatur oleh **daya drag**.

Daya yang dibutuhkan untuk mengatasi drag adalah

$$P_D = F_D v = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_D$$

dan skalanya dengan kubus kecepatan. Inilah mengapa roket mempercepat cepat: jika mereka berlama-lama, drag mengonsumsi energinya secara eksponensial. Kapal udara mengambil rute sebaliknya: ia mempercepat di mana ρ begitu kecil sehingga P_D tetap terbatas bahkan pada kilometer per detik.

Jika, misalnya, $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ (tipikal dekat ketinggian 60 km), $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$, dan $v = 1.000 \text{ m/s}$, maka

$$P_D = 0.5 \times 10^{-5} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^4 \text{ W},$$

atau 25 kW – mudah dicapai surya. Sebaliknya, di permukaan laut konfigurasi yang sama akan membutuhkan 25 gigawatt.

Aturannya sederhana: **udara tipis membeli waktu, dan waktu mengantikan propelan.**

Peluang Elektroaerodinamika

Pada awal abad ke-20, fisikawan mengamati bahwa medan listrik kuat dekat elektroda tajam di udara menghasilkan korona biru samar dan aliran udara halus. “Angin listrik” ini berasal dari transfer momentum antara ion dan netral. Itu dianggap sebagian besar sebagai rasa ingin tahu hingga elektronik tegangan tinggi matang. Ketika diatur dengan benar, efeknya bisa menghasilkan dorongan yang terukur.

Propulsi elektroaerodinamika bekerja dengan menerapkan tegangan tinggi antara **emitter**, kawat tipis atau tepi yang menghasilkan ion, dan **kolektor**, elektroda yang lebih lebar yang menerimanya. Ion dipercepat di medan listrik, bertabrakan dengan molekul udara netral, dan memberi momentum maju ke gas. Perangkat merasakan reaksi yang sama dan berlawanan, menghasilkan dorongan.

Sementara demonstrasi awal sederhana, eksperimen terbaru – termasuk pesawat sayap tetap **ion** yang diterbangkan oleh MIT pada 2018 – membuktikan bahwa penerbangan stabil dan senyap mungkin. Namun ide tersebut mendahului tonggak itu. Bertahun-tahun sebelumnya, penelitian ke **formulasi berbasis tensor Maxwell** dorongan elektroaerodinamika telah menunjukkan bagaimana fisika yang sama bisa diskalakan ke geometri lebih besar dan udara lebih tipis. Dalam formalisme itu, dorongan tidak berasal dari “angin” tapi dari **stres elektromagnetik** yang diintegrasikan atas volume wilayah pelepasan.

Persamaan yang relevan diturunkan dari **tensor stres Maxwell \mathbf{T}** , yang untuk medan elektrostatik adalah

$$\mathbf{T} = \epsilon (\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \mathbf{I})$$

di mana ϵ adalah permitivitas medium, \mathbf{E} adalah vektor medan listrik, dan \mathbf{I} tensor identitas. Gaya elektromagnetik bersih pada badan diperoleh dengan mengintegrasikan

tensor ini atas permukaannya:

$$\mathbf{F}_{\text{EM}} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS.$$

Dalam wilayah terionisasi, ini disederhanakan menjadi **kepadatan gaya volume**

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon,$$

di mana ρ_e adalah kepadatan muatan lokal. Dalam gas dengan permitivitas yang hampir seragam, istilah kedua hilang, meninggalkan **gaya badan Coulomb** yang elegan

$$\mathbf{f} \approx \rho_e \mathbf{E}.$$

Ekspresi ringkas ini adalah esensi propulsi elektroaerodinamika: di mana pun medan listrik dan muatan ruang koeksistensi, gaya badan bersih bertindak pada medium.

Ion itu sendiri sedikit, tapi momentumnya disampaikan ke netral melalui tabrakan. Jalur bebas rata-rata λ antara tabrakan menentukan bagaimana momentum berdifusi; itu skalanya terbalik dengan tekanan. Pada tekanan lebih rendah, ion bepergian lebih jauh per tabrakan, dan efisiensi transfer momentum berubah. Ada **pita tekanan optimal** di mana ion masih bisa bertabrakan cukup sering untuk mendorong gas tapi tidak begitu sering sehingga membuang energi memanaskannya. Untuk atmosfer Bumi, pita itu terletak kira-kira antara beberapa torr dan beberapa millitorr – tepat rentang yang ditemui antara 40 dan 80 km ketinggian.

Ambil kapal udara dengan demikian menjadi tuan rumah ideal untuk ubin elektroaerodinamika yang beroperasi di lingkungan alami mereka. Atmosfer itu sendiri adalah massa reaksi.

Fisika Propulsi Elektroaerodinamika

Pada pandangan pertama, propulsi elektroaerodinamika tampak tidak mungkin. Ide bahwa set elektroda yang diam dan senyap bisa menghasilkan dorongan cukup kuat untuk memindahkan kapal udara terasa bertentangan dengan pengalaman sehari-hari. Ketiadaan massa reaksi yang terlihat atau mesin bergerak menantang intuisi. Namun setiap ion yang hanyut di medan listrik membawa momentum, dan momentum dilestarikan. Medan bertindak sebagai tuas tak terlihat, dan udara sebagai cairan kerjanya.

Dasar fenomena ini bukan pada fisika plasma eksotis tapi pada **persamaan Maxwell** dan ekspresi mekaniknya, **tensor stres Maxwell**. Formulasi tensorial ini membuat jelas bahwa medan listrik bukan hanya pola potensial – mereka menyimpan dan meneruskan stres mekanis di medium sekitarnya.

Stres Medan dan Gaya Badan Coulomb

Tensor stres Maxwell dalam elektrostatik adalah

$$\mathbf{T} = \epsilon (\mathbf{EE} - \frac{1}{2} E^2 \mathbf{I})$$

di mana ϵ adalah permitivitas, \mathbf{E} medan listrik, dan \mathbf{I} tensor identitas. Istilah pertama mewakili tekanan arah sepanjang garis medan, dan istilah kedua tegangan isotopik yang menolak divergensi medan.

Gaya elektromagnetik bersih pada badan yang direndam dalam medan seperti itu adalah integral permukaan dari tensor ini:

$$\mathbf{F}_{\text{EM}} = \oint_{\partial V} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS.$$

Secara fisik, ekspresi ini memberi tahu kita bahwa medan listrik memberikan stres pada batas-batas wilayah mana pun yang berisi muatan atau gradien dielektrik. Tapi itu bisa ditulis ulang dalam bentuk volumetrik lebih lokal menggunakan teorema divergensi:

$$\mathbf{f} = \nabla \cdot \mathbf{T} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon.$$

Istilah pertama, $\rho_e \mathbf{E}$, adalah **gaya badan Coulomb** yang akrab: kepadatan muatan yang mengalami medan. Istilah kedua hanya penting di mana permitivitas medium berubah cepat, seperti pada batas material. Di udara, ϵ pada dasarnya seragam, jadi $\nabla \epsilon \approx 0$, meninggalkan

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}.$$

Persamaan yang tampak sederhana ini mengkode seluruh prinsip propulsi elektroaerodinamika. Jika ada volume gas di mana ion (dengan kepadatan ρ_e) mengalami medan listrik \mathbf{E} , maka **kepadatan gaya bersih** bertindak pada gas itu. Besar dorongan total adalah integral volume dari $\rho_e \mathbf{E}$ atas wilayah pelepasan:

$$\mathbf{F} = \int_V \rho_e \mathbf{E} dV.$$

Elektroda merasakan reaksi yang sama dan berlawanan, menghasilkan dorongan.

Transfer Momentum dan Peran Tabrakan

Ion di udara jarang bepergian jauh sebelum bertabrakan dengan molekul netral. **Jalur bebas rata-rata** λ berbanding terbalik dengan tekanan gas p dan penampang σ :

$$\lambda \approx \frac{kT}{\sqrt{2\pi d^2 p}}$$

di mana d adalah diameter molekul. Di permukaan laut, λ kecil – orde puluhan nanometer. Di mesosfer (sekitar 70 km), λ meregang menjadi milimeter atau sentimeter.

Ketika ion dipercepat di bawah medan, ia mentransfer momentum ke netral melalui tabrakan. Setiap tabrakan berbagi pecahan dari momentum arah ion; efek kumulatif adalah **aliran netral massal** – apa yang dieksperimener sebut *angin ionik*. Gas bergerak dari emitter ke kolektor, dan elektroda mengalami reaksi dorongan berlawanan.

Di udara sangat padat, ion bertabrakan terlalu sering; kecepatan drift mereka jenuh, dan energi hilang sebagai panas. Di udara sangat tipis, tabrakan terlalu jarang; ion terbang bebas tapi tidak menyeret netral secara efektif. Di antara dua ekstrem itu terletak **titik**

manis di mana jalur bebas rata-rata memungkinkan transfer momentum efisien – tepat wilayah yang dilalui kapal udara menuju luar angkasa.

Pada tekanan sekitar 10^{-2} hingga 10^{-4} bar (setara dengan 40–80 km ketinggian), ion bisa dipercepat atas jarak makroskopik sebelum bertabrakan, namun tabrakan masih terjadi cukup sering untuk menghasilkan dorongan. **Kopling elektroaerodinamika** antara medan dan gas berada pada yang paling menguntungkan.

Hubungan Daya-Dorongan

Daya listrik yang diserahkan ke pelepasan adalah $P = \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dV$, yang kira-kira IV untuk arus tetap I dan tegangan V . Keluaran mekanis berguna adalah dorongan kali kecepatan massa udara yang dipercepat, tapi dalam propulsi steady-state kita paling tertarik pada **rasio dorongan-daya**, T/P .

Studi empiris melaporkan nilai T/P berkisar dari beberapa millinewton per watt (**mN/W**) hingga hampir **0.1 N/W** dalam kondisi dioptimalkan. Di udara atmosferik pada tekanan standar, EAD tidak efisien; tapi pada tekanan yang dikurangi, mobilitas ion meningkat dan kepadatan arus bisa dipertahankan pada tegangan lebih rendah, meningkatkan T/P .

Argumen dimensi sederhana menghubungkan kepadatan gaya badan $f = \rho_e E$ dengan kepadatan arus $J = \rho_e \mu E$, di mana μ adalah mobilitas ion. Maka

$$f = \frac{J}{\mu},$$

jadi untuk kepadatan arus yang diberikan, mobilitas lebih tinggi (dicapai pada tekanan lebih rendah) menghasilkan lebih banyak dorongan per arus. Daya listrik total adalah $P = JEV$, jadi **dorongan-daya** skalanya sebagai

$$\frac{T}{P} \approx \frac{1}{E\mu},$$

menunjukkan bahwa medan listrik lebih rendah atau mobilitas ion lebih tinggi meningkatkan efisiensi. Tapi E lebih rendah juga mengurangi arus dan dengan demikian dorongan total, jadi lagi ada rezim optimal.

Hubungan ini bukan rasa ingin tahu teoretis – mereka menentukan desain setiap ubin EAD. Pada ketinggian yang diberikan, tegangan, jarak celah, dan geometri emitter harus disetel sehingga **kurva Paschen** (yang menghubungkan tegangan tembus dengan produk tekanan-jarak) terpenuhi tapi tidak melebihi.

Hukum Paschen untuk udara dapat diekspresikan kira-kira sebagai

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln[\ln(1+1/\gamma_{se})]}$$

di mana A dan B adalah konstanta empiris dan γ_{se} adalah koefisien emisi elektron sekunder. Geometri variabel kapal udara memungkinkan d , jarak elektroda, untuk disesuaikan secara dinamis untuk mempertahankan pelepasan korona efisien tanpa busur saat tekanan sekitar turun selama pendakian.

Geometri Medan dan Topologi Stres

Demonstrasi “lifter” awal menggunakan kawat tipis sebagai emitter dan foil datar sebagai kolektor. Garis medan sangat melengkung, dan sebagian besar energi pergi ke pemeliharaan korona daripada menghasilkan dorongan berguna. Efisiensi buruk karena **medan stres Maxwell** tidak selaras dengan arah dorongan yang diinginkan.

Wawasan kunci – dikembangkan dalam karya teoretis sebelum ionoplane MIT – adalah memperlakukan medan listrik bukan sebagai produk sampingan tapi sebagai variabel desain primer. Dorongan muncul dari **integral stres elektromagnetik** sepanjang garis medan, jadi tujuannya adalah membentuk garis-garis itu agar paralel dan konsisten di seluruh wilayah luas. Analogi adalah aerodinamis: seperti aliran laminer halus yang meminimalkan drag, topologi medan elektrostatik halus memaksimalkan stres yang diarahkan.

“Insinyur topologi medan” ini merangkum ulang perangkat sebagai *aktuator elektrostatik* daripada mainan plasma. Dengan mengontrol kelengkungan elektroda, potensial penjaga, dan lapisan dielektrik, **E** bisa dibuat hampir seragam di seluruh jalur percepatan, menghasilkan stres kuasi-linear dan menghindari fokus diri destruktif yang menyebabkan busur.

Konsekuensinya adalah skalabilitas. Ketika elektroda ditesselasi menjadi ubin meter persegi, masing-masing dengan konverter tegangan tinggi dan logika kontrolnya sendiri, seluruh amplop kapal udara bisa diubah menjadi array EAD terdistribusi raksasa. Tidak ada bagian bergerak untuk disinkronkan, hanya medan untuk dikoordinasikan.

Kepadatan Dorongan dan Jalan ke Skalabilitas

Kepadatan gaya badan volumetrik adalah $f = \rho_e E$. Kepadatan muatan dalam pelepasan korona tipikal pada tekanan atmosfer adalah orde 10^{-5} hingga 10^{-3} C/m^3 . Pada tekanan yang dikurangi, itu bisa turun sedikit, tapi medan listrik **E** bisa ditingkatkan dengan aman hingga puluhan kilovolt per sentimeter tanpa tembus.

Jika $\rho_e = 10^{-4} \text{ C/m}^3$ dan $E = 10^5 \text{ V/m}$, kepadatan gaya adalah $f = 10 \text{ N/m}^3$. Disebar atas wilayah aktif setebal 1 m, itu memberikan tekanan permukaan 10 N/m^2 – setara dengan beberapa millipascal. Itu mungkin terdengar kecil, tapi atas ribuan meter persegi itu menjadi signifikan. Permukaan 1000 m^2 dengan stres 10 N/m^2 menghasilkan 10.000 N dorongan, cukup untuk mempercepat kendaraan multi-ton pada tingkat millig – tepat rezim yang diperlukan untuk peningkatan orbit mingguan.

Perkiraan seperti ini mengilustrasikan mengapa EAD, meskipun kepadatan daya rendahnya, menjadi layak untuk **struktur besar dan ringan** di udara tipis. Berbeda dengan nosel roket, yang mendapatkan efisiensi hanya ketika kepadatan daya tinggi, EAD mendapatkan keuntungan dari luas. Amplop kapal udara menyediakan luas berlimpah; mengubahnya menjadi permukaan aktif adalah kecocokan alami.

Zona Manis Atmosfer Atas

Setiap sistem fisik memiliki niche operasi. Untuk propulsi EAD, rezim terbaik adalah di mana tekanan gas cukup rendah untuk memungkinkan tegangan tinggi dan jalur bebas ion panjang, tapi tidak begitu rendah sehingga plasma menjadi bebas tabrakan.

Di bawah sekitar 20 km, atmosfer terlalu padat: mobilitas ion rendah, tegangan tembus tinggi, dan energi terbuang memanaskan gas. Di atas sekitar 100 km, udara terlalu jarang: ionisasi tidak bisa dipertahankan secara kontinu, dan massa reaksi netral hilang. Antara sekitar 40 dan 80 km terletak **pita transisi** – mesosfer bawah – di mana propulsi EAD bisa menghasilkan rasio dorongan-daya terbaiknya.

Nyaman, ini juga rentang ketinggian di mana daya surya tetap hampir tidak meredup dan drag aerodinamis orde magnitudo lebih kecil daripada di permukaan laut. Itu jendela sempit tapi pemaaf, koridor alami untuk jenis kendaraan baru: bukan pesawat maupun roket, tapi sesuatu yang hidup di tumpang tindih di antara keduanya.

Efisiensi dan Aliran Energi

Pada setiap saat, daya input listrik \mathbf{P} dibagi di antara:

1. **Daya dorongan mekanis berguna** $P_T = T v_{\text{eff}}$, di mana v_{eff} adalah kecepatan buang efektif aliran udara.
2. **Kerugian ionisasi** P_i , energi yang diperlukan untuk mempertahankan plasma.
3. **Kerugian resistif** P_r , karena pemanasan ohmik dan kebocoran.
4. **Kerugian radiasi** P_γ , yang dipancarkan sebagai cahaya (kilau korona yang akrab).

Efisiensi keseluruhan adalah $\eta = P_T / \mathbf{P}$. Eksperimen menunjukkan η bisa mencapai beberapa persen di udara padat dan potensial puluhan persen dalam operasi tekanan rendah yang dioptimalkan. Meskipun sederhana, angka-angka ini memadai untuk sistem bertenaga surya yang beroperasi selama durasi panjang, di mana efisiensi bisa ditukar dengan waktu.

Berbeda dengan propulsi kimia, yang harus mencapai efisiensi tinggi per detik untuk meminimalkan bahan bakar, kapal udara EAD surya bisa mampu inefisiensi jika bisa **beroperasi tanpa batas**. Metrik keberhasilan bukan impuls spesifik tapi **kesabaran spesifik**: joule yang terkumpul selama hari.

Dari Stres Maxwell ke Dorongan Makroskopik

Untuk mengilustrasikan hubungan antara teori medan dan pengalaman sehari-hari, pertimbangkan kondensor pelat paralel dalam vakum. Tekanan antara pelat adalah $p = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$. Jika $E = 10^6 \text{ V/m}$, maka $p \approx 4.4 \text{ N/m}^2$. Kalikan dengan luas, dan Anda mendapatkan gaya mekanis yang diperlukan untuk memisahkan pelat. Stres elektrostatik secara harfiah adalah tekanan mekanis.

Propulsi EAD mengganti satu pelat dengan atmosfer itu sendiri. Ion adalah medium di mana stres medan diteruskan. Alih-alih tekanan statis, kita mendapatkan aliran arah. Persamaan $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ adalah analog dinamis dari tekanan kondensor statis itu.

Ketika dijumlahkan atas permukaan kapal udara, stres terintegrasi menjadi vektor dorongan bersih, sama seperti tekanan terintegrasi atas permukaan sayap menghasilkan angkat. Analogi itu dalam: angkat aerodinamis adalah fluks momentum udara yang dibelokkan oleh permukaan; dorongan EAD adalah fluks momentum ion yang dipercepat oleh medan.

Ionoplane MIT dan Bukti Eksperimental

Selama dekade, skeptis membuang EAD sebagai rasa ingin tahu laboratorium. Kemudian, pada 2018, pesawat sayap tetap kecil yang dibangun oleh MIT mendemonstrasikan **penerbangan stabil tanpa baling-baling** yang didukung semata-mata oleh dorongan elektroaerodinamika. "Ionoplane" berbobot sekitar 2,5 kg dan terbang puluhan meter dengan daya baterai. Rasio dorongan-beratnya kecil, tapi pencapaiannya historis: kendaraan yang lebih berat dari udara pertama yang dipertahankan dalam penerbangan oleh propulsi ionik.

Krucial, teori dan dasar konseptual yang mengarah ke demonstrasi itu sudah dalam pengembangan secara independen. Kerangka teoretis yang disajikan dalam *Propulsi Elektroaerodinamika* (lihat https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html) telah menggambarkan mekanisme yang sama dalam istilah **stres Maxwell** dan **gaya badan Coulomb** bertahun-tahun sebelumnya, menekankan topologi medan dan skalabilitas daripada kimia korona.

Ionoplane MIT membuktikan kepraktisan efek di udara padat. Proyek Rise-Fly-Orbit bertujuan untuk memperluasnya ke udara tipis, di mana fisika menjadi lebih menguntungkan. Jika pesawat kecil bisa terbang pada 1 bar, kapal udara surya bisa terbang ke orbit pada mikrobars, dengan kesabaran dan sinar matahari yang cukup.

Keutamaan Kesederhanaan

Propulsi EAD secara konseptual elegan: tanpa bagian bergerak, tanpa pembakaran, tanpa knalpot kecepatan tinggi, tanpa kriogenik. Komponennya tahan lama secara alami – elektroda, dielektrik, konverter daya, dan kulit fotovoltaik. Sistem skalanya secara alami dengan luas, bukan massa.

Tantangan teknis bergeser dari termodinamika ke **teknik listrik dan ilmu material**: mencegah erosi korona, mengelola kebocoran muatan, dan mempertahankan isolasi tegangan tinggi dalam tekanan yang bervariasi. Ini bisa diselesaikan dengan material modern dan mikroelektronik.

Karena mekanisme EAD bergantung hanya pada geometri medan dan mobilitas ion, ia **modular secara inheren**. Setiap meter persegi kulit kapal udara bisa diperlakukan sebagai ubin dengan T/P dan karakteristik tegangan yang diketahui. Dorongan total kendaraan adalah jumlah vektor dari ribuan ubin independen. Modularitas ini memungkinkan degradasi anggun – kegagalan beberapa modul tidak mengorbankan seluruh perangkat.

Kapal Udara Elektroaerodinamika sebagai Sistem

Ketika dikaitkan dengan daya surya, proporsi EAD menjadi bukan hanya sumber dorongan tapi **sistem iklim** untuk kendaraan. Medan yang sama yang menghasilkan dorongan juga mengionisasi gas jejak, mengurangi pengisian permukaan, dan berpotensi memengaruhi sifat lapisan batas. Medan listrik bahkan bisa berfungsi sebagai “layar elektrostatik” yang dapat disetel, berinteraksi lemah dengan medan magnet Bumi atau plasma sekitar di atmosfer atas.

Dalam jangka panjang, kita bisa membayangkan kontrol aktif drag dengan memanipulasi distribusi muatan permukaan – **perisai drag elektrodinamik** yang bervariasi stres medan lokal untuk memangkas jalur penerbangan tanpa permukaan kontrol mekanis.

Kemungkinan ini memindahkan proporsi EAD melampaui rasa ingin tahu dan ke ranah teknologi kontrol penerbangan solid-state serbaguna – berlaku di mana pun gas atau plasma bisa dipolarisasi dan dipercepat oleh medan listrik.

Arsitektur Teknik dan Dinamika Penerbangan

Keuntungan mendasar konsep Rise-Fly-Orbit bukan pada material eksotis atau fisika revolusioner, tapi pada **pengaturan ulang prinsip-prinsip yang akrab**. Mengambang, daya surya, dan elektrostatik semuanya dipahami dengan baik. Yang baru adalah cara mereka diurutkan menjadi satu kontinum: *pendakian tanpa momen diskontinuitas*.

Roket melewati rezim-rezim berbeda – peluncuran, pembakaran, meluncur, orbit. Kapal udara elektroaerodinamika, sebaliknya, hanya mengalami transisi bertahap. Ia naik dengan ringan, terbang dengan angkat, dan orbit dengan inersia. Setiap tahap berbaur ke tahap berikutnya, diatur oleh interaksi stabil yang sama dari gaya mengambang, aerodinamis, dan elektrostatik.

Amplop: Struktur sebagai Atmosfer

Amplop kapal udara harus memenuhi tuntutan yang bertentangan: harus **ringan dan kuat, konduktif dan isolatif, transparan terhadap sinar matahari tapi tahan radiasi**. Ini bisa didamaikan melalui konstruksi berlapis.

Lapisan terluar bisa menjadi **polimer metalisasi** – misalnya, film tipis Kapton berlapis aluminium atau polietilen tereftalat. Lapisan ini menyediakan pelindung UV dan berfungsi sebagai permukaan elektroda parsial untuk ubin EAD. Di bawahnya terletak **lapisan dielektrik** yang mencegah pelepasan yang tidak diinginkan dan mendefinisikan celah ke elektroda kolektor dalam. Struktur dalam adalah jaringan membran tegang dan penyangga yang mempertahankan geometri keseluruhan pada overpressure internal kecil, orde $\Delta p \approx 300 \text{ Pa}$ – hanya beberapa ribu dari tekanan atmosfer.

Overpressure ini cukup untuk menjaga amplop tegang tapi tidak cukup untuk menyebabkan massa struktural signifikan. Secara efektif, seluruh kendaraan adalah kondensor raksasa dan ringan, kulitnya bermuatan dan hidup dengan garis medan.

Volume internal diisi dengan gas pengangkat – hidrogen atau helium. Karena overpressure yang diperlukan kecil, tuntutan beban pada material sederhana. Tantangan utama adalah permeabilitas gas dan degradasi UV selama misi panjang, keduanya bisa diatasi dengan lapisan modern dan film berlapis.

Hidrogen atau Helium

Pilihan gas membentuk kepribadian kendaraan.

Hidrogen menawarkan pengangkat tertinggi, menyediakan sekitar 10% lebih mengambang daripada helium. Perbedaan itu menjadi substansial ketika volume total mencapai jutaan meter kubik. Hidrogen juga lebih mudah didapat dan bahkan bisa dihasilkan di tempat dengan elektrolisis surya air. Kerugiannya, tentu saja, mudah terbakar.

Kehadiran elektrostatik tegangan tinggi membuat pengelolaan hidrogen tidak sepele. Keamanan bergantung pada kompartmentalisasi teliti, penyaringan elektrostatik, dan ventilasi. Modul EAD sendiri disegel dan dipisahkan dari sel gas oleh penghalang dielektrik, dan perbedaan potensial di seluruh lambung diminimalkan oleh distribusi muatan simetris.

Helium, sebaliknya, inert dan aman tapi menyediakan angkat lebih rendah dan biaya lebih tinggi. Kerugian utamanya adalah kelangkaan; penggunaan skala besar bisa membebani pasokan. Untuk kendaraan uji awal dan penerbangan demonstrasi publik, helium adalah pilihan bijaksana. Untuk upaya orbit operasional di koridor terpencil, hidrogen mungkin dibenarkan oleh kinerja dan biaya.

Bagaimanapun, desain amplop sebagian besar kompatibel; hanya penanganan gas dan sistem keamanan yang berbeda.

Daya Surya dan Manajemen Energi

Matahari adalah mesin kapal. Setiap watt energi listrik dimulai sebagai sinar matahari yang diserap oleh kulit fotovoltaik.

Fotovoltaik ber-efisiensi tinggi dan ultraketat – komposit film tipis gallium-arsenida atau perovkit yang dilaminasi ke permukaan kapal udara – bisa mencapai daya spesifik mendekati **300–400 W/kg**. Array diatur secara konformal untuk mempertahankan kehalusan aerodinamis. Manajemen daya terdistribusi: setiap bagian panel memberi makan pelacak titik daya maksimum lokal (MPPT) yang mengatur tegangan ke bus tegangan tinggi yang memasok ubin EAD.

Karena kendaraan mengalami siklus siang-malam, ia membawa **penyangga energi sederhana** – baterai ringan atau superkondensator – untuk mempertahankan operasi tingkat rendah melalui kegelapan. Tapi ini tidak besar; filosofi desain sistem adalah **penggerak surya langsung**, bukan energi tersimpan. Pada ketinggian orbit, kapal bisa mengejar sinar matahari hampir kontinu, hanya menyelam ke gerhana sebentar.

Kontrol termal ditangani secara radiatif. Dengan konveksi yang diabaikan pada ketinggian tinggi, penolakan panas bergantung pada **permukaan emissivitas tinggi** dan jalur konduksi ke radiator. Untungnya, proses EAD relatif dingin – tidak ada pembakaran – dan beban termal utama dari sinar matahari yang diserap.

Ubin Elektroaerodinamika

Setiap meter persegi amplop berfungsi sebagai **ubin EAD** – sel propulsi mandiri yang terdiri dari emitter, kolektor, dan sirkuit kontrol kecil. Emitter mungkin jaring halus titik tajam atau kawat pada potensial positif tinggi, sementara kolektor adalah jaring lebar yang dipegang dekat tanah atau pada potensial negatif. Ruang di antaranya adalah wilayah pelepasan terkendali.

Ketika diaktifkan, ubin membentuk medan listrik E , menghasilkan kepadatan muatan ρ_e , dan menghasilkan dorongan lokal $f = \rho_e E$ yang diarahkan secara tangensial sepanjang permukaan. Dengan memodulasi tegangan pada ubin berbeda, kapal udara bisa mengarahkan, memicingkan, dan berguling tanpa bagian bergerak.

Geometri adaptif adalah kunci. Saat tekanan sekitar turun dengan ketinggian, jalur bebas rata-rata meningkat. Untuk mempertahankan pelepasan efisien, jarak celah efektif d antara emitter dan kolektor harus meningkat secara kasar sebanding dengan $1/p$. Ini bisa dicapai dengan **pemisah dielektrik fleksibel dan mengembang** yang mengembang sedikit saat tekanan eksternal turun, atau dengan **modulasi elektronik** gradien potensial untuk meniru celah lebih besar.

Setiap ubin melaporkan telemetri – arus, tegangan, hitungan busur – ke pengontrol pusat. Jika ubin mengalami busur atau degradasi, ia dimatikan dan dilewati. Desain modular berarti kehilangan ubin individu hampir tidak memengaruhi dorongan total.

Dari Mengambah ke Dorongan

Penerbangan dimulai dengan lembut. Pada peluncuran, kapal udara naik mengambah ke stratosfer. Selama pendakian, sistem EAD beroperasi dalam mode daya rendah, menyediakan dorongan kecil untuk stabilisasi dan kontrol drift.

Pada ketinggian sekitar 30–40 km, di mana udara tipis tapi masih kolisional, percepatan utama dimulai. Kapal udara berputar secara bertahap ke penerbangan horizontal, mengorientasikan sumbu panjangnya ke arah gerakan orbit yang dimaksudkan.

Awalnya, dorongan diseimbangkan antara percepatan horizontal dan augmentasi angkat. Mengambah residu kendaraan mengimbangi sebagian besar beratnya; dorongan EAD menyediakan komponen maju dan sedikit ke atas. Saat kecepatan meningkat, angkat dinamis tumbuh dan mengambah menjadi tidak signifikan. Transisi halus – tidak ada “momen lepas landas” karena kapal udara tidak pernah duduk di landasan pacu.

Pendakian Tiga Minggu

Pertimbangkan massa kendaraan representatif $m = 2000 \text{ kg}$. Untuk mencapai kecepatan orbit $v = 7.8 \times 10^3 \text{ m/s}$ dalam $t = 1.8 \times 10^6 \text{ s}$ (tiga minggu), dorongan rata-rata yang diperlukan adalah

$$T = m \frac{v}{t} = 2000 \times \frac{7.8 \times 10^3}{1.8 \times 10^6} \approx 8.7 \text{ N}.$$

Delapan newton – berat jeruk kecil – adalah dorongan total yang dibutuhkan untuk mencapai orbit jika diterapkan secara kontinu selama tiga minggu.

Jika T/P sistem adalah **0.03 N/W**, tipikal operasi EAD efisien pada tekanan rendah, maka menghasilkan 8,7 N hanya memerlukan sekitar **290 W** daya. Ini tampak mengejutkan kecil, dan dalam praktik, kerugian drag tambahan akan menaikkan persyaratan menjadi puluhan kilowatt. Tapi panel surya yang menutupi beberapa ratus meter persegi bisa dengan mudah menyediakannya.

Mari sertakan faktor keselamatan 100 untuk inefisiensi dan drag: sekitar **30 kW** daya listrik. Dengan efisiensi keseluruhan 15% dari sinar matahari ke dorongan, kendaraan harus memanen sekitar **200 kW daya surya**. Itu sesuai dengan sekitar 700 meter persegi area surya aktif pada output 300 W/m^2 – area lebih kecil dari lapangan sepak bola, mudah diintegrasikan ke kapal udara panjang 100 meter.

Aritmatika sederhana ini menunjukkan bahwa **aliran energi masuk akal**. Apa yang dicapai roket melalui kepadatan daya, kapal udara capai melalui kesabaran dan luas.

Drag dan Koridor Ketinggian Tinggi

Drag tetap menjadi penyerap energi utama. Gaya drag adalah $F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D$, dan daya yang sesuai adalah $P_D = F_D v = \frac{1}{2} \rho v^3 A C_D$.

Pada 50 km, $\rho \approx 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Jika $A = 100 \text{ m}^2$, $C_D = 0.05$, dan $v = 1000 \text{ m/s}$, maka $P_D = 0.5 \times 10^{-3} \times (10^3)^3 \times 100 \times 0.05 = 2.5 \times 10^6 \text{ W}$.

Itu 2,5 megawatt – terlalu tinggi. Tapi pada 70 km, di mana $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$, konfigurasi yang sama hanya menghasilkan 25 kW daya drag. Maka strateginya: **naik saat mempercepat**, tetap pada lintasan di mana ρv^3 tetap kasar konstan.

Koridor optimal adalah yang dengan udara yang semakin tipis secara bertahap, mungkin ketinggian 40–80 km, di mana atmosfer menyediakan kepadatan netral cukup untuk fungsi EAD tapi cukup sedikit untuk menjaga drag dapat dikelola.

Kontrol Kendaraan dan Stabilitas

Tanpa baling-baling atau sirip, stabilitas berasal dari simetri medan. Aktivasi diferensial ubin menyediakan torsi. Jika ubin depan di kiri menghasilkan sedikit lebih banyak dorongan daripada di kanan, kapal yaw lembut. Kontrol pitch dicapai dengan bias ubin atas dan bawah. Karena dorongan per ubin kecil, respons lambat, tapi kapal beroperasi dalam rezim di mana kelincahan tidak perlu.

Sensor sikap – giroskop, akselerometer, pelacak bintang – memberi makan sistem kontrol digital yang mempertahankan orientasi untuk insiden surya maksimal dan jalur penerbangan yang benar. Ukuran besar kendaraan dan rezim penerbangan lambat membuatnya sangat stabil.

Keamanan Termal dan Listrik

Operasi EAD melibatkan puluhan hingga ratusan kilovolt pada arus rendah. Di udara tipis dan kering stratosfer, isolasi berperilaku berbeda: busur bisa menyebar jarak jauh di permukaan. Desain listrik kapal udara memperlakukan seluruh struktur sebagai sistem potensial terkendali. Jalur konduktif redundan, dengan lapisan isolasi yang memisahkan sel gas dari garis HV.

Busur tidak katastrofik – cenderung lokal dan self-quenching – tapi bisa merusak elektroda. Setiap ubin memantau bentuk gelombang arusnya; jika pelepasan spike, pengontrol mengurangi tegangan atau mematikan modul yang terkena selama beberapa detik.

Termal, ketiadaan konveksi berarti pemanasan lokal apa pun harus disebarluaskan oleh konduksi ke panel radiatif. Material dipilih untuk emissivitas tinggi dan penyerapan rendah di inframerah, memungkinkan panas berlebih untuk diradiasikan ke luar angkasa.

Skalabilitas dan Modularitas

Sistem skalanya dengan penyelarasan, bukan dengan peningkatan tegangan. Menggandakan jumlah ubin menggandakan dorongan; tidak perlu pelepasan lebih besar. Ini membuat arsitektur **skalabel linear** dari model laboratorium ke kendaraan orbit.

Prototipe praktis mungkin dimulai sebagai platform kecil berisi helium dengan selusin meter persegi permukaan EAD, menghasilkan dorongan millinewton yang diukur selama jam. Demonstrator lebih besar bisa mengikuti, masing-masing memperluas luas dan daya. Versi orbit akhir mungkin membentang ratusan meter, dengan ribuan ubin yang dikontrol secara independen, beroperasi di bawah daya surya penuh selama berbulan-bulan.

Karena semua komponen adalah solid-state, sistem memiliki umur layanan panjang secara inheren. Tidak ada bantalan turbin atau siklus pembakaran untuk aus – hanya erosi elektroda bertahap dan penuaan material. Dengan desain hati-hati, waktu rata-rata antara kegagalan bisa mencapai tahun.

Profil Pendakian dan Transisi Ketinggian

Misi lengkap bisa divisualisasikan sebagai spiral halus di bidang (v, ρ) : saat kecepatan meningkat, kepadatan menurun. Jalur dipilih sehingga produk ρv^3 – yang menentukan daya drag – tetap di bawah ambang yang bisa disuplai sistem surya.

1. **Pendakian mengambang** ke 30–40 km.
2. **Fase percepatan:** pertahankan $P_D \approx 20\text{--}50 \text{ kW}$ secara kasar konstan dengan menyesuaikan pitch dan ketinggian.

3. **Transisi ke rezim orbit:** di atas 70 km, angkat dan mengambang hilang, dan kapal udara secara efektif menjadi satelit yang masih menggores atmosfer.

Transisi dari “penerbangan” ke “orbit” bukan batas tajam. Atmosfer memudar secara bertahap; dorongan mengkompensasi drag hingga drag tidak lagi penting. Jalur kendaraan menjadi melingkar daripada balistik, dan ia tetap di udara tanpa batas.

Keseimbangan Energi dan Ketahanan

Mengintegrasikan atas pendakian penuh, input energi total dari Matahari sangat besar dibandingkan dengan yang dibutuhkan. Bahkan pada laju pengumpulan sederhana 100 kW, tiga minggu operasi kontinu mengakumulasi

$$E = 100,000 \times 1.8 \times 10^6 = 1.8 \times 10^{11} \text{ J.}$$

Untuk kendaraan 2000 kg, itu **90 MJ/kg** – tiga kali persyaratan energi kinetik orbit. Sebagian besar energi ini akan hilang ke drag dan inefisiensi, tapi marginnya murah hati.

Ini adalah keajaiban tenang kesabaran surya: ketika waktu diizinkan meregang, kelimpahan energi mengantikan kelangkaan daya.

Pemeliharaan, Kembali, dan Penggunaan Ulang

Setelah menyelesaikan misi orbitnya, kapal udara bisa melambat secara bertahap dengan membalikkan polaritas medan EAD. Drag meningkat saat turun; mekanisme yang sama yang mengangkatnya sekarang bertindak sebagai rem. Kendaraan bisa memasuki stratosfer lagi dan melayang turun di bawah mengambang residu.

Karena tidak ada tahap yang dibuang, sistem **sepenuhnya dapat digunakan ulang**. Amplop bisa diservis, diisi ulang, dan diluncurkan ulang. Pemeliharaan melibatkan penggantian ubin atau film yang rusak daripada membangun ulang mesin.

Berbeda dengan roket kimia, di mana setiap peluncuran mengonsumsi tangki dan propelan, kapal udara EAD adalah **pesawat luar angkasa daur ulang energi**. Matahari mengisi ulang secara kontinu; hanya keausan yang memerlukan intervensi manusia.

Signifikansi Teknik yang Lebih Luas

Teknologi yang sama yang memungkinkan kapal udara EAD surya – fotovoltaik ringan, elektronik daya tegangan tinggi, dielektrik film tipis – memiliki aplikasi terrestrial langsung. Platform komunikasi stratosfer, sensor iklim ketinggian tinggi, dan drone tahan lama panjang semuanya mendapat manfaat dari perkembangan yang sama.

Dengan mengejar sistem yang mampu mencapai orbit tanpa bahan bakar, kita juga menemukan kelas baru **kendaraan udara solid-state** – mesin yang terbang bukan dengan pembakaran tapi dengan manipulasi medan.

Dalam arti ini, proyek Rise-Fly-Orbit berada dalam garis yang mencakup Wright Flyer dan roket berbahan bakar cair pertama: bukan teknologi yang disempurnakan, tapi **bukti**

prinsip yang mengubah arti "penerbangan".

Regulasi, Strategi, dan Filsafat Pendakian Lambat

Fisika kapal udara elektroaerodinamika surya permisif; undang-undang tidak. Aturan penerbangan hari ini membagi langit menjadi domain yang dibatasi rapi: **ruang udara** yang diatur oleh hukum penerbangan, dan **luar angkasa** yang diatur oleh hukum luar angkasa. Di antaranya terletak wilayah abu-abu – terlalu tinggi untuk sertifikasi pesawat, terlalu rendah untuk pendaftaran orbit. Kapal udara ke orbit hidup tepat di abu-abu itu, bergerak secara kontinu melalui ketinggian yang, di atas kertas, tidak termasuk dalam kategori apa pun.

Mengapa Itu "Tidak Mungkin"

Statuta ruang udara mengasumsikan kendaraan yang lepas landas dan mendarat dalam jam. Mereka memerlukan mesin bersertifikat, permukaan kontrol aerodinamis, dan kemampuan untuk menyerah pada lalu lintas. Tidak satu pun dari asumsi ini cocok dengan balon otonom bertenaga surya yang mungkin berlama-lama berminggu-minggu di atas 60 km.

Regulasi kendaraan peluncuran dimulai di mana roket menyala: pengapian diskrit, situs peluncuran, dan sistem terminasi penerbangan yang dirancang untuk menahan ledakan. Kapal udara kami tidak memiliki yang mana pun dari ini. Ia naik perlahan seperti awan; tidak ada momen "peluncuran." Namun karena akhirnya akan melebihi Mach 1 dan mencapai kecepatan orbit, itu jatuh di bawah yurisdiksi penerbangan luar angkasa. Hasilnya paradoksal: itu tidak bisa secara hukum terbang sebagai pesawat, namun harus dilisensikan sebagai roket yang tidak mirip dengannya.

Kelas Kendaraan Hibrida Atmosferik-Orbit

Pengobatannya adalah mengakui kategori baru – **Kendaraan Hibrida Atmosferik-Orbit (HAOV)**. Ciri-ciri definisinya akan menjadi:

- **Penyeberangan domain kontinu:** pendakian dari permukaan ke luar angkasa dekat tanpa tahap diskrit.
- **Fluks energi kinetik rendah:** pertukaran momentum total dengan atmosfer orde magnitudo jauh di bawah roket.
- **Perilaku aman pasif:** pada kehilangan daya, kapal hanyut dan turun; itu tidak jatuh secara balistik.
- **Pelacakan kooperatif:** selalu terlihat oleh radar dan sensor satelit, menyiaran vektor statusnya seperti transponder ADS-B untuk pesawat.

Kerangka HAOV akan memungkinkan sertifikasi kapal seperti itu di bawah **kriteria berbasis kinerja** daripada **berbasis perangkat keras** – mendefinisikan keamanan dalam istilah pelepasan energi, jejak tanah, dan kemampuan penurunan otonom daripada kehadiran mesin atau bahan bakar.

Koridor samudera atau gurun bisa ditetapkan di mana HAOV boleh beroperasi secara kontinu, dipantau oleh jaringan lalu lintas luar angkasa yang ada. Pendakian mereka akan menimbulkan bahaya lebih sedikit untuk penerbangan daripada balon cuaca tunggal, namun aturan saat ini tidak menawarkan jalur bagi mereka.

Politik Kesabaran

Regulasi mengikuti budaya, dan budaya kecanduan kecepatan. Tonggak sejarah aerospace diukur dalam rasio dorongan-berat dan menit ke orbit. Ide bahwa kendaraan mungkin memakan waktu **tiga minggu** untuk mencapai orbit terdengar, pada pendengaran pertama, seperti kemunduran. Tapi kesabaran adalah harga keberlanjutan. Kapal udara mengusulkan metrik berbeda: bukan “seberapa cepat kita bisa membakar energi” tapi “seberapa kontinu kita bisa mengumpulkannya”.

Bagi badan antariksa yang terbiasa dengan jendela peluncuran dan hitung mundur, kapal seperti itu menuntut pergeseran dalam operasi: perencanaan misi berdasarkan musim daripada detik; penyisipan orbit yang bergantung pada geometri sinar matahari, bukan ketersediaan landasan. Namun perubahan ini selaras dengan giliran yang lebih luas menuju **infrastruktur steady-state** – pesawat luar angkasa surya-listrik, stasiun yang dapat digunakan ulang, platform iklim persisten.

Nilai Strategis

Kendaraan surya-EAD yang dapat digunakan ulang menawarkan kemampuan yang tidak bisa dicocokkan oleh roket atau pesawat:

- **Pengamatan dan komunikasi ketinggian tinggi yang persisten:** sebelum orbit penuh, kapal udara bisa melayang berbulan-bulan di stratosfer atas, merelai data atau mengimage Bumi.
- **Pengiriman muatan bertahap:** muatan kecil bisa dinaikkan dengan lembut tanpa guncangan akustik dan termal peluncuran.
- **Analogi planet:** di Mars, di mana kecepatan orbit hanya 3,6 km/s dan tekanan atmosfer mendukung percepatan ion jalur panjang, arsitektur yang sama bisa berfungsi lebih baik.
- **Pengawasan lingkungan:** tanpa knalpot, tanpa tumpahan propelan, dampak akustik yang diabaikan.

Secara ekonomi, HAOV operasional pertama tidak akan menggantikan roket tapi melengkapi mereka, melayani niche di mana kesabaran muatan mengalahkan urgensi. Secara strategis, mereka akan memisahkan akses ke luar angkasa dekat dari rantai pasok propelan – fitur menarik bagi badan antariksa yang mencari infrastruktur berkelanjutan.

Teknik Buku Aturan

Membuat kategori HAOV lebih tentang **pengukuran** daripada lobi. Regulator mempercayai data. Jalan ke depan adalah transparansi eksperimental:

1. **Demonstrator berbasis helium** di koridor terpencil, diinstrumentasikan untuk merekam lintasan, penggunaan energi, dan perilaku kesalahan.
2. **Telemetri kontinu** yang dibagikan dengan penerbangan sipil dan jaringan pelacakan luar angkasa untuk membuktikan dinamika penerbangan yang dapat diprediksi.
3. **Simulasi dan model risiko** yang menunjukkan bahwa fluks energi kinetik kasus terburuk atas wilayah berpenduduk tidak signifikan.

Begini badan melihat bukti terkuantifikasi bahwa HAOV tidak bisa merusak pesawat atau populasi tanah, arsitektur hukum akan mengikuti – seperti yang dilakukan untuk balon ketinggian tinggi dan drone sebelumnya.

Dimensi Etis

Penerbangan lambat memiliki bobot moral. Peluncur kimia mencemari bukan karena insinyur ceroboh tapi karena fisika tidak menawarkan waktu untuk mendaur ulang panas mereka. Kapal udara surya, sebaliknya, tidak mengonsumsi apa pun yang tidak dapat dipulihkan. Ia mengganti kebisingan dengan keheningan, kilatan dengan cahaya. Pendakiannya akan terlihat dari tanah sebagai titik terang yang tidak terburu-buru, artefak manusia yang naik tanpa kekerasan.

Di era urgensi, gerakan yang disengaja seperti itu adalah pernyataan: bahwa ambisi teknologi tidak perlu meledak untuk menjadi mendalam.

Kesabaran Cahaya

Ketika roket mencapai orbit, ia melakukannya dengan percepatan kasar: detik pembakaran yang meninggalkan langit bergetar. Kapal udara elektroaerodinamika tiba berbeda. Setiap foton yang menyentuh kulitnya berkontribusi bisikan momentum, dimediasi oleh elektron, ion, dan matematika tenang persamaan Maxwell. Selama tiga minggu bisikan ini terakumulasi menjadi orbit.

Ekspresi yang sama – $\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E}$ – yang menggambarkan mikroampere drift ion di laboratorium juga mengatur badan pengangkat seribu ton yang meluncur melalui atmosfer atas. Skalanya berubah; prinsipnya tidak. Tensor Maxwell, hukum Coulomb, dan kesabaran cahaya matahari bersifat universal.

Jika umat manusia belajar memanfaatkan kesabaran itu, kita mendapatkan cara baru untuk meninggalkan Bumi – satu yang bisa diulang tanpa batas, didukung oleh bintang yang sama yang mempertahankan kita.

Menuju Era Penerbangan yang Dapat Dibalik

Teknologi roket kimia adalah gestur satu arah: upaya besar untuk mencapai orbit, dan akhir mendadak pada re-entry. Kapal udara elektroaerodinamika menyarankan **jalan yang dapat dibalik**. Ia bisa naik dan turun sesuka hati, tinggal di mana saja dari troposfer ke orbit. Ia adalah pesawat luar angkasa dan habitat, kendaraan dan stasiun.

Dalam kontinuitas itu terletak pembalikan filosofis: penerbangan luar angkasa bukan sebagai kepergian tapi sebagai perluasan atmosfer. Gradien dari udara ke vakum menjadi medan yang dapat dinavigasi. Kapal seperti itu akan mengaburkan garis antara meteorologi dan astronotika, mengubah “tepian luar angkasa” menjadi ruang kerja hidup daripada penghalang.

Refleksi Penutup

Tidak diperlukan fisika baru – hanya ketahanan, presisi, dan regulasi yang dibayangkan ulang. Anggaran energi orbit bisa dibayar dengan sinar matahari; dorongan bisa muncul dari medan listrik yang bertindak pada ion; waktu bisa dipinjam dari kesabaran insinyur.

Hambatannya budaya dan birokratis: meyakinkan badan bahwa sesuatu yang terlihat seperti balon bisa, melalui matematika dan ketekunan, menjadi satelit. Namun setiap teknologi transformatif dimulai sebagai anomali dalam dokumen.

Ketika yang pertama dari kapal elektroaerodinamika surya ini naik, kemajuannya akan hampir tak terlihat jam demi jam. Tapi hari demi hari ia akan mengumpulkan kecepatan, hingga akhirnya meluncur di luar jangkauan cuaca. Tidak akan ada raungan – hanya dengung samar, kontinu dari medan dan akumulasi stabil sinar matahari menjadi gerakan.

Itu akan menandai awal **akses yang dapat digunakan ulang, berkelanjutan, dan lembut ke orbit**: cara untuk naik, terbang, dan – tanpa pernah menyalaikan korek api – orbit.

Referensi & Bacaan Lebih Lanjut

- **Proyek Rise Fly Orbit:** <https://riseflyorbit.org/> - gambaran konsep kapal udara surya-ke-orbit dan penelitian terkait.
- **Esai Propulsi Elektroaerodinamika:**
https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/en.html - perlakuan teoretis mendalam dorongan elektroaerodinamika menggunakan tensor stres Maxwell dan formulasi gaya badan Coulomb.
- Barrett, S. et al., *Nature* (2018). “Flight of an Aeroplane with Solid-State Ionic Propulsion.” - demonstrasi pertama pesawat sayap tetap bertengara ion solid-state.
- Paschen, F. (1889). “Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure erforderliche Potentialdifferenz.” *Annalen der Physik*, 273(5).
- Sutton & Biblarz, *Rocket Propulsion Elements*, 9th ed. - untuk kontras dalam anggaran energi dan pertimbangan Δv .
- NASA Glenn Research Center, “Solar Electric Propulsion Basics.” - latar belakang sistem dorongan listrik surya ber-efisiensi tinggi.