

[https://farid.ps/articles/electroaerodynamic\\_propulsion/id.html](https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/id.html)

# Propulsi Elektroaerodinamika - Didukung oleh Maxwell dan Coulomb

Wawasan yang disajikan dalam esai ini berasal dari puluhan eksperimen yang dilakukan oleh penulis antara tahun 2016 dan 2018, mengeksplorasi propulsi elektroaerodinamika dengan berbagai sumber daya (AC dan DC), geometri elektroda, dan jenis emiter ion. Penelitian ini mencapai puncaknya dengan pembuatan rotor 80 cm yang digambarkan di bawah ini, yang mencapai kecepatan rotasi 18 rpm menggunakan kurang dari 6 kV dan hanya sekitar 100 mW daya listrik masukan.

Kampanye eksperimental ini mengungkapkan bahwa kinerja bergantung jauh lebih pada distribusi dan geometri medan elektrostatik daripada pergerakan udara atau arus ion itu sendiri. Pengamatan ini meletakkan dasar untuk pembingkaian teori ulang propulsi elektroaerodinamika yang mengikuti.

## Propulsi Elektroaerodinamika - Mesin yang Sunyi

Propulsi elektroaerodinamika (EAD) - sering disebut dorongan elektrohidrodinamika (EHD) atau "angin ion" - adalah salah satu teknologi langka yang terlihat seperti fiksi ilmiah: perangkat yang bergerak secara sunyi melalui udara tanpa bagian bergerak, tanpa pembakaran, dan tanpa knalpot yang terlihat. Publik pertama kali mendengarnya pada awal 2000-an melalui proyek "lifter" rumahan, dan lagi pada 2018 ketika MIT mendemonstrasikan "pesawat ion" yang meluncur melintasi gymnasium.

Namun, fisika dasarnya memiliki sejarah yang lebih panjang dan rumit. Hampir satu abad sebelumnya, Thomas Townsend Brown dan Paul Biefeld mengamati bahwa kapasitor tegangan tinggi dapat menghasilkan dorongan kecil tetapi persisten. Brown mengaitkan efek tersebut dengan "anti-gravitasi". Ilmu modern, yang dipersenjatai dengan hukum Maxwell dan Coulomb, mengakui bahwa kebenaran lebih halus - dan, dalam banyak hal, lebih mendalam.

Propulsi EAD bukan tentang meniup udara dengan ion. Ini tentang **memahat medan listrik** sehingga **tegangan elektrostatik** yang dihasilkan menghasilkan gaya mekanik bersih. Dalam pengertian ini, perangkat EAD didukung oleh Maxwell dan Coulomb: oleh geometri dan dinamika medan listrik itu sendiri.

## Salah Paham tentang Angin Ion

Tanyakan kepada kebanyakan insinyur tentang propulsi EHD dan Anda akan mendengar cerita sederhana: emiter tajam menghasilkan ion melalui pelepasan korona; ion-ion ini berakselerasi menuju elektroda pengumpul, bertabrakan dengan molekul udara netral di sepanjang jalan dan mentransfer momentum ke mereka. Gas netral bergerak - yang

disebut "angin ion" - dan menurut hukum ketiga Newton, perangkat mengalami dorongan yang sama dan berlawanan.

Gambar ini tidak salah, tapi tidak lengkap.

Dalam praktiknya, ion membawa massa yang diabaikan. Tabrakan mereka dengan netral memang sering, ya, tapi momentum yang ditransfer per tabrakan sangat kecil. Yang lebih penting, **tidak ada gaya mekanik signifikan yang bertindak langsung pada ujung jarum atau pengumpul**. "Angin" adalah produk sampingan, bukan sumber, propulsi.

Mesin sejati terletak pada **medan listrik** yang mempercepat ion-ion tersebut - pada redistribusi energi elektrostatik saat muatan ruang terbentuk dan mengalir.

## Tekanan Medan dan Tensor Tegangan Maxwell

Persamaan Maxwell menggambarkan bagaimana medan listrik menyimpan dan mentransfer momentum melalui **tensor tegangan Maxwell**:

$$\mathbf{T} = \epsilon_0(\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2\mathbf{I})$$

Mengintegrasikan tensor ini di atas permukaan benda apa pun menghasilkan **tekanan elektrostatik bersih** yang bertindak padanya. Tekanan ini - bukan pergerakan udara - yang mendorong pendorong EHD maju.

Ketika pelepasan korona terjadi, awan ion terbentuk di sekitar emiter. Ion-ion ini melakukan dua hal kritis:

1. **Mereka sebagian melindungi medan listrik emiter.** Kekuatan medan lokal menurun di dekat ujung, tapi tetap kuat di volume sekitarnya.
2. **Mereka mendistorsi geometri medan secara keseluruhan.** Di satu sisi emiter, garis medan berakhir pada permukaan bermuatan dekat atau struktur yang dibumikan. Di sisi lain, garis tersebut membentang keluar, sebagian dinetralkan oleh muatan ruang.

Hasilnya adalah **ketidakseimbangan tekanan elektrostatik** pada sistem emiter-pengumpul - gaya bersih. Momentum mengalir dari medan ke elektroda, bukan melalui tabrakan molekuler.

## Hukum Coulomb Beraksi

Pada tingkat paling sederhana, gaya yang terlibat digambarkan oleh hukum Coulomb:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

Setiap elemen permukaan bermuatan dari struktur EHD menarik atau menolak setiap wilayah bermuatan lain di lingkungannya. Dorongan total adalah jumlah vektor dari

interaksi Coulomb yang tak terhitung jumlahnya ini, yang terus dibentuk ulang oleh ion bergerak yang memodulasi medan.

Dalam korona keadaan stabil, selubung tipis ion positif berada di antara emiter tegangan tinggi dan pengumpul yang relatif negatif (atau lingkungan sekitar). Ion-ion tersebut berfungsi sebagai **perantara**: mereka sebagian melindungi tarikan antara emiter dan pengumpul, dan dengan bergerak, terus mengatur ulang asimetri medan. Masukan listrik stabil mempertahankan ketidakseimbangan itu, mengubah energi potensial elektrostatik menjadi gaya mekanik.

## Pelajaran dari NASA dan Batas Paradigma Angin Ion

Pada awal 2000-an, NASA dan kontraktornya meninjau ulang perangkat tipe Biefeld-Brown di bawah studi Gravitec dan Talley AIAA. Menggunakan kapasitor asimetris tegangan tinggi di lingkungan atmosfer dan vakum, eksperimen dimaksudkan untuk menguji apakah efek tersebut bertahan tanpa udara.

Hasilnya tak terbantahkan - dan secara tidak sengaja mengungkapkan.

Dalam mode atmosfer, rotor mencapai rotasi yang hampir tidak terukur (1–2 rpm) dan dorongan di kisaran 10–100  $\mu\text{N}$  - orde magnitudo di bawah apa yang diharapkan jika perangkat benar-benar memanfaatkan efek gravitasi. Gerakan sepenuhnya dapat dikaitkan dengan pelepasan korona konvensional dan angin ion lemah.

Dalam vakum, pada tekanan hingga  $10^{-6}$  Torr, gerakan berhenti sepenuhnya. Sinyal sementara apa pun dilacak ke outgassing atau muatan permukaan residu. Tanpa molekul udara untuk mempertahankan ionisasi, medan elektrostatik menjadi simetris, dan gaya hilang.

Para peneliti menyimpulkan bahwa dorongan skalanya kira-kira linear dengan kepadatan udara - temuan yang sering dikutip untuk "membantah" proporsi EHD sebagai ketidakmungkinan vakum. Tapi apa yang benar-benar ditunjukkan adalah sesuatu yang lebih dalam: **tanpa medium untuk membawa muatan ruang, medan listrik kehilangan asimetri yang menghasilkan gradien tekanan elektrostatik**.

Dengan kata lain, tes awal tersebut secara tidak sengaja mengonfirmasi **interpretasi tensor tegangan Maxwell** dari proporsi elektroaerodinamika. Bukan gravitasi yang bekerja, bukan sekadar seret ion - yang penting adalah kehadiran **ketidakseimbangan medan yang dimediasi muatan**.

Perangkat Gravitec, dibangun untuk kesederhanaan dan simetri, kekurangan *reservoir muatan* signifikan atau *dielektrik pembentuk medan*. Geometri terbukanya menyebarluaskan garis medan ke lingkungan, membuang sebagian besar energi elektrostatik.

Sebaliknya, rotor EPS-aluminium yang dijelaskan di sini memusatkan muatan di sepanjang kulit konduktif yang didefinisikan dengan baik, memungkinkan wilayah muatan ruang *memahat* medan lokal. Hasilnya: dorongan yang dapat digunakan dengan kurang dari 6

kV dan sekitar 100 mW - kinerja hampir dua orde magnitudo lebih baik dalam efisiensi energi.

Temuan ini menggemarkan tema yang konsisten: **efisiensi elektroaerodinamika muncul bukan dari tegangan atau aliran udara, tapi dari kontrol topologi muatan dan geometri medan.**

## Efek Reservoir Muatan

Foil ringan di atas inti kaku dan isolator berperilaku lebih dari sekadar konduktor - ia membentuk **reservoir muatan luas** yang memperkuat asimetri medan listrik. Dalam desain saat ini, polystyrene ekspansi (EPS) berfungsi murni sebagai **penyangga struktural ringan**, dengan seluruh permukaannya dibungkus foil aluminium yang **kontinu secara listrik dengan pasokan tegangan tinggi**. EPS menambahkan fungsi listrik yang diabaikan; nilainya terletak pada memungkinkan permukaan konduktif besar dengan massa minimal.

Kulit konduktif luas ini menyimpan muatan langsung dari sumber daya, memungkinkan pelepasan korona beroperasi melawan **medan elektrostatik yang dimuat sebelumnya** daripada membangunnya dari awal di setiap siklus. Luas permukaan foil yang tinggi meningkatkan kapasitansi efektif secara dramatis - dalam orde  $10\text{--}100 \text{ pF cm}^{-2}$ , tergantung pada tekstur permukaan dan kelengkungan - dan mengubah tegangan yang diterapkan sederhana menjadi gradien medan listrik lokal yang jauh lebih kuat.

Ketika korona menyala, foil bertindak sebagai referensi potensial stabilisasi. Ion yang dipancarkan sedikit memodulasi medan lokal tapi tidak mendominasinya; sebaliknya, muatan permukaan yang disimpan mempertahankan asimetri stabil yang menghasilkan dorongan kontinu dengan daya sangat rendah.

Dari perspektif tensor tegangan Maxwell, gaya sebanding dengan integral kekuatan medan dan gradiennya:

$$\mathbf{F} \approx \epsilon_0 \int (\mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}) dV$$

dan foil besar yang dimuat dengan baik memaksimalkan kedua istilah tanpa memerlukan tegangan lebih tinggi atau arus lebih tinggi. Ini menjelaskan mengapa rotor daya rendah dan tegangan rendah bisa mencapai rotasi signifikan: ia menggantikan **energi elektrostatik yang disimpan** dengan kerugian arus ion berat dari geometri "angin ion" konvensional - bentuk praktis dari *efisiensi elektrostatik*.

## Geometri Efisiensi

Efisiensi pendorong EHD ditentukan bukan oleh kecepatan aliran udara, tapi oleh **seberapa efektif medan listrik dibentuk**. Parameter kunci meliputi:

- **Asimetri Medan:** Komponen arah bersih dari gradien tekanan elektrostatik.

- **Distribusi Kepadatan Muatan:** Bagaimana awan ion memodifikasi medan itu melalui perisai parsial.
- **Kopling Kapasitif:** Total muatan yang disimpan pada permukaan yang saling berhadapan per volt yang diterapkan.
- **Saluran Kerugian:** Kerugian korona, rekombinasi, dan kebocoran dielektrik.

Desain yang membatasi dan membentuk medan - misalnya, dengan menempatkan permukaan bermuatan berlawanan luas dekat emiter - dapat mencapai perbaikan orde magnitudo dalam dorongan per watt. Medan listrik yang melakukan pekerjaan; ion hanya memungkinkan medan tetap asimetris dan dinamis.

## Mengunjungi Kembali Biefeld-Brown

Pengamatan awal Brown tentang dorongan dari kapasitor asimetris mendahului pemahaman modern kita tentang fisika plasma. Tanpa kerangka tensor tegangan Maxwell atau dinamika muatan ruang, wajar untuk berpikir bahwa efek tersebut mungkin melibatkan gravitasi. Fakta bahwa pendorong EHD menghasilkan gaya "melawan" vektor medan (dan kadang-kadang secara vertikal ke atas) hanya memperdalam misteri.

Dilihat melalui lensa hari ini, "anti-gravitasi" Brown hanyalah tekanan elektrostatik yang dibuat terlihat. Kesamaan dalam bentuk matematis - baik energi potensial gravitasi maupun elektrostatik menurun sebagai  $1/r^2$  - membuat kebingungan secara historis dapat dimengerti, tapi fisikanya sepenuhnya elektromagnetik.

## Perspektif dan Konteks Modern

Analisis terbaru dan diskusi sesama memperkuat pembingkaian ulang ini dari propulsi elektroaerodinamika sebagai **fenomena gradien medan** daripada mesin angin ion. Dalam konfigurasi lifter klasik, arus korona dalam orde miliampercara pada puluhan kilovolt menghasilkan kepadatan dorongan dalam kisaran mikro- hingga mili-newton per watt - pantulan dari seberapa sedikit energi medan listrik yang berakhir sebagai tegangan mekanik yang diarahkan. Sebaliknya, rotor EPS yang dibungkus foil mengubah hukum fisik yang sama menjadi proses *didukung muatan*: permukaan konduktif luas mempertahankan gradien  $E$  kuat dengan arus minimal, menukar kerugian drift dengan energi medan yang disimpan.

Pembedaan ini menggemarkan pergeseran yang lebih luas dalam penelitian kontemporer. **Aktuator pelepasan penghalang dielektrik** dalam kontrol aerodinamika juga mengerahkan gaya permukaan mereka dari tensor tegangan Maxwell daripada aliran udara volume, mencapai efisiensi  $10-100 \text{ N kW}^{-1}$  ketika geometri elektroda disesuaikan untuk asimetri. **Geometri elektroda mengambang dan penahanan** yang sedang dipelajari di ONERA dan dalam program EHD UE menunjukkan peningkatan dorongan dua hingga lima kali lipat dengan membentuk selubung ion - tepat logika desain rotor reservoir muatan. Dan di **lingkungan udara tipis**, seperti stratosfer atas atau atmosfer Mars, di mana seret ion melemah tapi tegangan elektrostatik tetap, permukaan kaya muatan dapat mempertahankan propulsi lama setelah desain konvensional gagal.

Fisika selaras dengan rapi dengan kerangka momentum Poynting dari elektromagnetisme klasik: dorongan sesuai dengan gradien densitas energi medan,

$$F \approx \epsilon_0 \int (\mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}), dV$$

artinya sistem menarik momentum langsung dari medan elektromagnetik. Ion adalah katalis yang mempertahankan ketidakseimbangan, bukan massa reaksi itu sendiri. Ini menjelaskan mengapa, dalam eksperimen vakum di mana medan menjadi simetris, dorongan hilang - istilah  $\nabla \mathbf{E}$  runtuh. Sebaliknya, di rotor reservoir foil, kulit kapasitif menjaga  $\mathbf{E}$  curam dan arah, menghasilkan sekitar **0.1-1 mN** dorongan setara torsi dari hanya **100 mW** daya masukan - 10-100 kali efisiensi perangkat seret ion.

Parameter	Desain Angin Ion Konvensional	Rotor Reservoir Muatan Foil	Implikasi
Tegangan	20-50 kV	< 6 kV	Risiko breakdown lebih rendah, penskalaan lebih mudah
Daya	1-10 W	$\approx 0.1$ W	$10-100\times$ dorongan lebih tinggi / W
Mekanisme Dorongan	Tabrakan ion-netral	Gradien medan (tegangan Maxwell)	Largely independen dari kepadatan udara
Pendorong Utama	Jarak emiter-pengumpul	Reservoir foil kapasitif	Muatan tersimpan > arus sementara
Efisiensi ( $N$ $kW^{-1}$ )	0.01-0.1	1-10 (disimpulkan)	Layak untuk mikro-UAV

Perbandingan seperti itu menyoroti pergeseran konseptual: **dari propulsi didorong arus ke didorong muatan**, dari memindahkan materi ke membentuk medan. Batas berikutnya adalah apa yang mungkin disebut *arsitektur elektrostatik* - menggunakan optimasi komputasional dan material canggih (emiter nanotube karbon, foil berpola, dielektrik metamaterial) untuk memaksimalkan  $\int \mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}$ . Mode DC pulsa hibrida dapat lebih jauh memanfaatkan penyimpanan muatan sementara sambil mengurangi produk sampingan kimia.

## Kesimpulan - Didukung oleh Maxwell dan Coulomb

Propulsi elektroaerodinamika bukanlah rasa penasaran eksotis atau anomali pseudosaintifik. Ini adalah manifestasi langsung dari hukum Maxwell dan Coulomb - mesin makroskopik yang mengubah energi potensial elektrostatik menjadi gerakan melalui asimetri medan yang dikendalikan.

Di mana penemu awal melihat "anti-gravitasi" dan proyek modern melihat "angin ion", cerita sebenarnya lebih sederhana dan lebih dalam: **medan listrik memiliki ketegangan**. Bentuk ketegangan itu, dan Anda bisa menarik diri melalui udara tanpa bagian bergerak, tanpa bahan bakar, dan tanpa suara.

Itulah jenius sunyi dari proporsi elektroaerodinamika - benar-benar, **didukung oleh Maxwell dan Coulomb.**

## Referensi

1. Talley, C. et al. *Evaluation of the Biefeld–Brown Effect: Asymmetric Capacitor Thruster Tests in Vacuum and Atmosphere*. AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
2. Brown, T. T. *Electrokinetic Apparatus*. U.S. Patent No. 3,187,206, 1965.
3. Wilson, S., Barrett, S. R. *Flight of an Aeroplane with Solid-State Ion Propulsion*. *Nature* **563**, 532–535 (2018).
4. Moreau, E. *Airflow Control by Non-Thermal Plasma Actuators*. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 605–636 (2007).
5. Ronney, P. D. *EHD Flow Control and Plasma Actuators*. NASA Technical Reports Server, 2015.
6. ONERA EHD Program: *Electrohydrodynamic Propulsion and Flow Control*. Internal Reports 2018–2023.