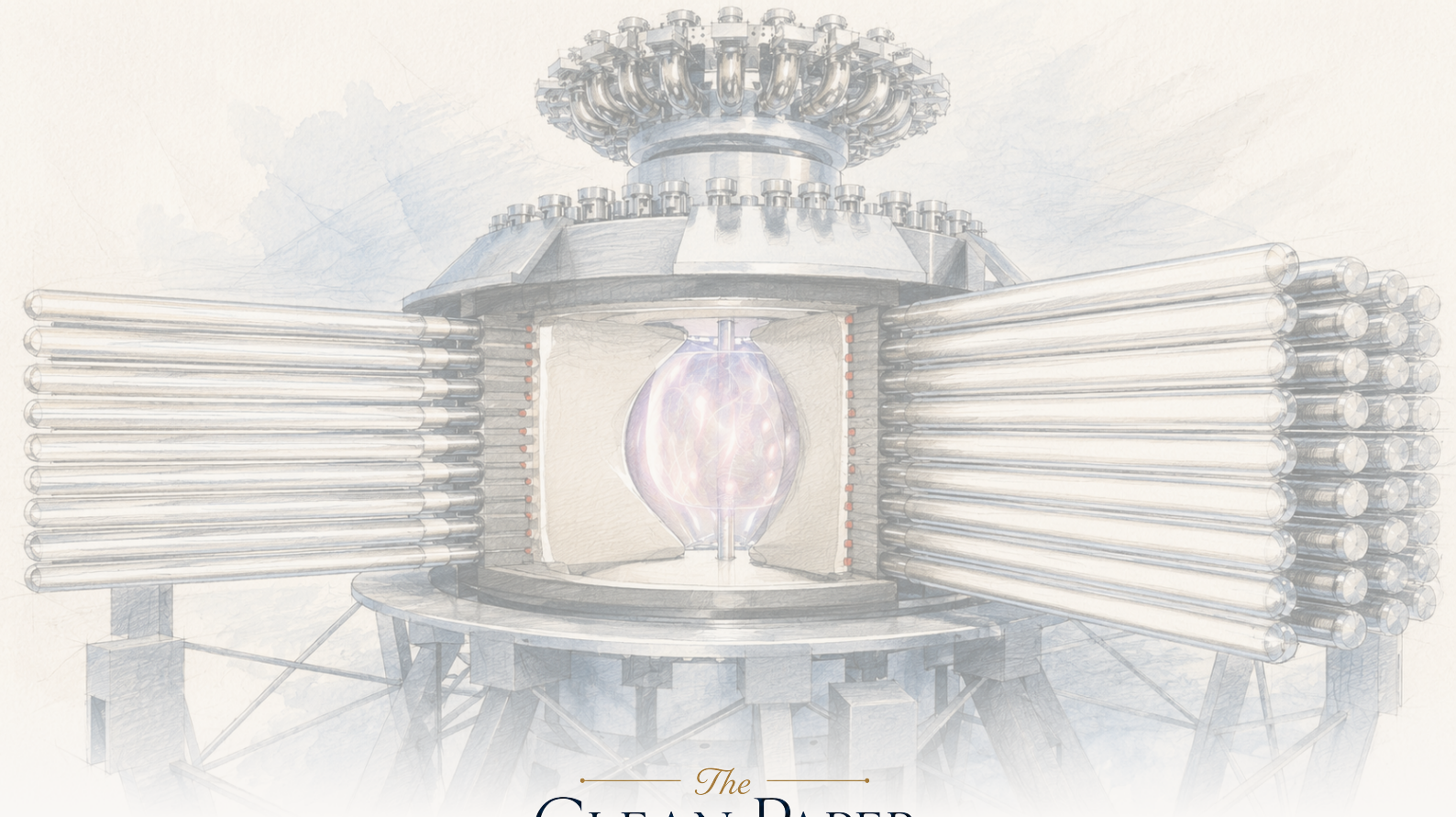


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Sebuah mesin pelakuran memanaskan plasma dengan memampatkannya — langkah sebenar, dan mengapa ia bukan loji janakuasa

LM26 milik General Fusion memampatkan plasma deuterium bermagnet dengan pelapik litium yang meruntuh ke dalam dan memerhatikannya menjadi panas — meningkatkan suhu elektronnya lebih tiga kali ganda ke puncak terukur kira-kira 0.72 keV (718 ± 80 eV, sekitar 8 juta °C), dengan sebahagian besar pemanasan dikaitkan dengan mampatan itu sendiri, mekanisme yang menjadi asas pendekatan pelakuran sasaran bermagnetnya. Ini titik semak kejuruteraan sebenar bagi laluan itu menuju pelakuran. Ia juga hanya 11 tembakan pertama pada satu mesin, diterangkan dalam pracetak syarikat yang belum melalui semakan rakan sebaya, pada suhu masih kira-kira sepuluh kali lebih rendah daripada yang diperlukan plasma terbakar — tanpa tenaga bersih, tanpa pulang modal, dan tanpa elektrik. Satu mekanisme ditunjukkan, bukan loji janakuasa dibina.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *The science of compressional heating on the LM26 magnetized target fusion experiment*, S. J. Howard et al. (General Fusion), arXiv:2606.23974 [physics.plasm-ph] (preprint) · DOI: 10.48550/arXiv.2606.23974

Sebuah mesin pelakuran memanaskan plasma dengan memampatkannya — langkah sebenar, dan mengapa ia bukan loji janakuasa

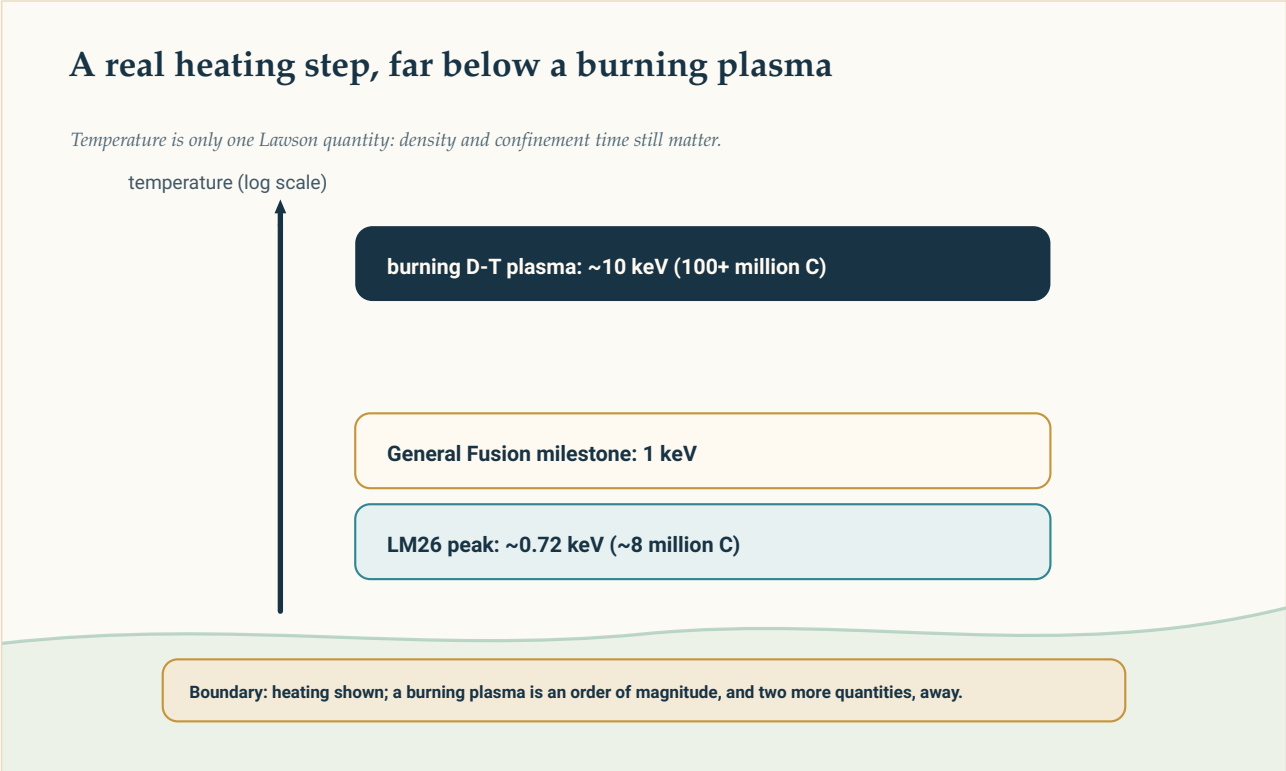
Untuk reaktor pelakuran menghasilkan lebih banyak tenaga daripada yang diperlukan untuk menjalankannya, plasma bahan api perlu serentak cukup panas, cukup padat dan dikekalkan bersama cukup lama — tiga kuantiti yang digabungkan dalam apa yang ahli fizik panggil kriteria Lawson. Kebanyakan bidang mengejarnya dengan magnet superkonduktor sangat besar (tokamak seperti ITER) atau susunan laser gergasi (pengurungan inersia, seperti di US National Ignition Facility). Sekumpulan syarikat yang lebih kecil mempertaruhkan laluan ketiga, **pelakuran sasaran bermagnet** (MTF): bentuk plasma suam bermagnet, kemudian *himpit* secara mekanikal dengan cepat, supaya mampatan melakukan pemanasan — seperti enjin diesel menyalakan bahan api melalui mampatan dan bukannya percikan.

Pada Jun 2026, syarikat Kanada **General Fusion** menyiarkan hasil daripada **Lawson Machine 26 (LM26)** yang menguji sama ada pertaruhan teras itu benar-benar berlaku: adakah memampatkan plasma bermagnet secara mekanikal memang memanaskannya seperti yang dijanjikan model? Merentas 11 tembakan mampatan pertama — apabila plasma deuterium tokamak sfera dihimpit oleh *pelapik litium pepejal* yang meruntuh ke dalam — tembakan terbaik menunjukkan plasma menjadi jauh lebih panas, lebih padat dan lebih kuat termagnet ketika dimampatkan, dan analisis syarikat mengaitkan sebahagian besar pemanasan itu kepada mampatan sendiri.

Ini hasil kejuruteraan yang nyata dan khusus bagi pendekatan MTF. Ia juga hanya set pertama tembakan, diterangkan dalam **pracetak syarikat yang belum melalui semakan rakan sebaya**, pada suhu yang masih jauh di bawah apa yang diperlukan plasma terbakar — dan ia bukan tenaga pelakuran, bukan pulang modal, dan bukan loji janakuasa.

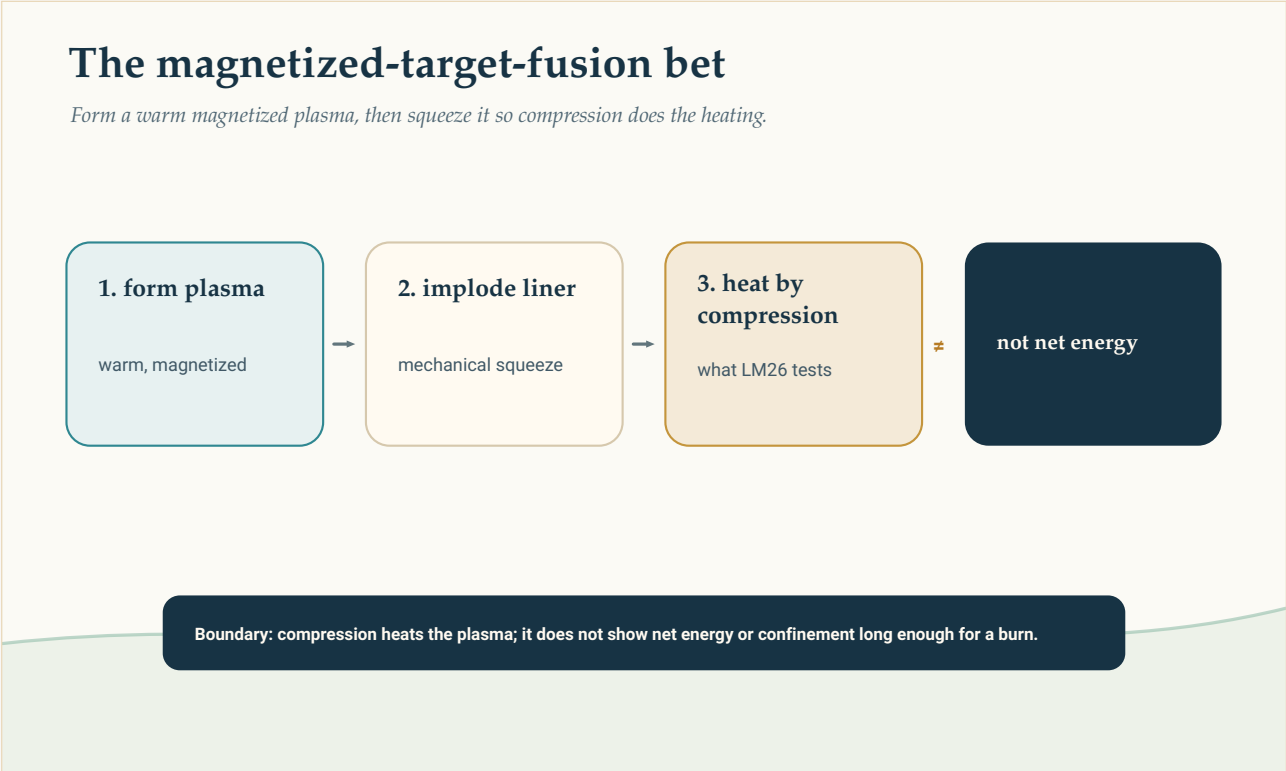
[video pending]

Ini rakaman promosi daripada General Fusion, disertakan untuk menunjukkan rupa LM26; ia bukan bukti bebas bahawa mesin akan mencapai sasaran pelakuran masa depannya.



Tangga suhu: ~0.72 keV LM26, sasaran 1 keV General Fusion, dan ~10 keV yang diperlukan plasma deuterium–tritium terbakar. Suhu hanya satu daripada tiga kuantiti Lawson.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Pelakuran sasaran bermagnet: bentuk plasma suam bermagnet, kemudian mampatkannya dengan pelapik yang meruntuh ke dalam supaya himpitan melakukan pemanasan — pertaruhan mampatan seperti diesel. LM26

menguji bahawa mampatan memanaskan plasma; bukan tenaga bersih atau pengurungan.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Apakah maksud "pelakuran sasaran bermagnet", "keV" dan kriteria Lawson

Suhu plasma dalam pelakuran biasanya dinyatakan dalam **kiloelectronvolt (keV)** dan bukannya darjah: 1 keV kira-kira **11.6 juta °C**. Bahan api deuterium–tritium perlu mencapai kira-kira **10 keV** (lebih 100 juta °C) untuk berlakur dengan cekap — tetapi suhu hanyalah satu daripada tiga perkara yang mesti dipenuhi serentak. **Kriteria Lawson** mengatakan reaktor juga memerlukan **ketumpatan** yang mencukupi dan **masa pengurungan** yang mencukupi, biasanya digabungkan menjadi satu "hasil darab tiga" (suhu × ketumpatan × masa pengurungan). Memanaskan plasma perlu, tetapi dengan sendirinya langsung tidak mencukupi.
Pelakuran sasaran bermagnet (MTF) ialah laluan tengah antara dua pendekatan arus perdana. Daripada mengurung plasma panas lama dengan magnet gergasi, atau memanaskan sasaran kecil hampir serta-merta dengan laser, MTF membentuk plasma bermagnet kemudian memampatkannya secara mekanikal dalam skala mikrodetik. Jika berfungsi, mampatan serentak memanaskan plasma dan menaikkan ketumpatannya — berpotensi mencapai keadaan pelakuran tanpa magnet skala ITER atau laser skala NIF. Sama ada mampatan benar-benar memberikan pemanasan itu dalam mesin sebenar ialah tepat perkara yang diuji mesin seperti LM26.

Apa yang dilakukan oleh para penulis

- Membina dan menembak **LM26**, mesin pelakuran sasaran bermagnet di General Fusion: plasma deuterium tokamak sfera dibentuk, kemudian dimampatkan oleh **pelapik litium pepejal** yang bergerak meruntuh ke dalam — kira-kira **mampatan jejari 3**×.
- Menjalankan **11 tembakan mampatan pertama** dan memasang banyak instrumen, membina semula suhu, ketumpatan dan medan magnet plasma sepanjang masa serta merekod neutron yang dipancarkan, sinar-X dan cahaya tampak, selain imej kamera pantas interaksi plasma–dinding.
- Membina **model fizik bersepadu** yang mengimbangi pemanasan daripada mampatan dengan pemanasan Ohmik (daripada arus plasma sendiri) dan tenaga yang hilang ke sempadan, kemudian membandingkannya dengan data terukur untuk menentukan dari mana pemanasan sebenarnya datang.

Apa yang mereka temui

- **Plasma menjadi panas ketika dihimpit.** Dalam tembakan terbaik, suhu elektron meningkat **lebih 3**×, ketumpatan elektron sekitar **10**×, dan medan magnet poloidal kira-kira **10**×, didorong oleh mampatan jejari 3×. Dalam tembakan terbaik, kertas mengukur **suhu elektron puncak**

kira-kira 0.72 keV (718 ± 80 eV, melalui hamburan Thomson) — kira-kira 8 juta °C.
- **Sebahagian besar pemanasan dikaitkan dengan mampatan.** Model bersepadu mereka menyimpulkan bahawa *majoriti* kenaikan suhu datang daripada mampatan mekanikal sendiri — mekanisme yang menjadi asas seluruh pendekatan MTF — bukannya pemanasan Ohmik.
- **Pancaran neutron meningkat semasa mampatan**, konsisten dengan plasma deuterium yang lebih panas dan lebih padat.

Apa yang tidak ditunjukkan oleh hasil ini

- Ini **bukan** tenaga pelakuran, pulang modal, atau keuntungan bersih. Tiada apa di sini menghasilkan lebih banyak tenaga daripada yang digunakan untuk menjalankannya. Hasil ini tentang *memanaskan plasma* — satu langkah dalam kitaran pelakuran — bukan tentang imbangan tenaga reaktor.
- Suhunya **masih kira-kira sepuluh kali terlalu rendah** untuk plasma terbakar. Kira-kira 0.72 keV bersamaan lebih kurang 8 juta °C; bahan api deuterium–tritium memerlukan sekitar **10 keV (lebih 100 juta °C)** *dan* ketumpatan × masa pengurungan yang cukup untuk mengekalkan pembakaran. Sasaran General Fusion sendiri seterusnya ialah **1 keV** — yang masih jauh daripada pencucuhan.
- "**Sebahagian besar pemanasan datang daripada mampatan**" ialah **kesimpulan berasaskan model**, bukan bacaan langsung. Ia datang daripada model fizik bersepadu yang dipadankan dengan diagnostik; sejauh mana anda mempercayai pembahagian antara mampatan, pemanasan Ohmik dan kehilangan bergantung pada sejauh mana model itu boleh dipercayai.
- Ini ialah **pracetak syarikat, belum disemak rakan sebaya.** Hasil dilaporkan sendiri oleh pasukan yang membina mesin dan telah mengumpul dana berdasarkan janjinya; semakan bebas belum berlaku.
- Peningkatan neutron **bukan** hasil pelakuran yang relevan untuk tenaga. Sedikit neutron memang dijangka daripada deuterium pada keadaan ini, jauh di bawah apa-apa yang berguna untuk kuasa.
- Ia tidak mengatakan apa-apa tentang kenyataan syarikat berasingan bahawa **loji masa depan akan menghantar elektrik ke grid** — dakwaan yang dilayan dengan sangat berhati-hati oleh laporan bebas.

Sejauh mana kukuh buktinya

- **Dakwaan teras sempit dan boleh diperiksa.** "Kami memampatkan plasma bermagnet dan ia menjadi lebih panas, kebanyakannya kerana mampatan" ialah tepat ujian mekanisme yang perlu dilepasi pendekatan MTF, dan kertas menyokongnya dengan set tembakan yang diinstrumentasikan secara meluas serta model imbangan tenaga eksplisit. Jika ia bertahan semakan rakan sebaya, ini pengesahan sebenar — walaupun masih awal — terhadap pendekatan itu.
- **Peringatan itu bersifat struktur, bukan kosmetik.** Sebelas tembakan, satu mesin, satu pasukan, belum disemak, dan suhu utama satu tertib magnitud di bawah plasma terbakar. Kesimpulan yang memikul beban — *majoriti pemanasan daripada mampatan* — bersandar pada model, jadi

soalan pusat semakan rakan sebaya ialah sama ada pembahagian model itu kukuh.
- **Status jujur ialah mekanisme ditunjukkan, bukan kejayaan tenaga didakwa.** Ia menggerakkan MTF daripada "mampatan *sepatutnya* memanaskan plasma" ke arah "mampatan *memang* memanaskan plasma," dan tidak lebih besar daripada itu.

Mengapa ia penting

Perkara menarik tentang pelakuran sasaran bermagnet ialah ekonomi, bukan rekod. Jika mampatan mekanikal boleh memanaskan plasma menuju keadaan pelakuran, mungkin ada laluan tanpa magnet skala ITER atau laser skala NIF — lebih murah dan membolehkan iterasi lebih pantas, *jika* ia berfungsi. "Jika" itulah keseluruhan permainan, dan ia bergantung pada titik semak yang tidak glamor seperti ini: adakah mampatan benar-benar memberi pemanasan yang dijanjikan model? Jawapan LM26 pada tembakan awalnya ialah ya yang bersyarat. Itu wajar dicatat tepat *kerana* ia bersyarat — satu anak tangga pada tangga panjang, dilaporkan oleh orang yang sedang memanjatnya, belum diperiksa sesiapa di luar, dan masih jauh di bawah puncak.

Ringkasan utama

LM26 milik General Fusion memampatkan plasma deuterium bermagnet dengan pelapik litium yang meruntuh ke dalam dan menunjukkan ia menjadi panas — meningkatkan suhu elektron lebih tiga kali ganda kepada puncak terukur kira-kira 0.72 keV (718 ± 80 eV, ~8 juta °C) — dengan analisis syarikat mengaitkan sebahagian besar pemanasan kepada mampatan sendiri, mekanisme yang menjadi asas pendekatan pelakuran sasaran bermagnet. Itu langkah kejuruteraan sebenar dan khusus bagi laluan pelakuran ini. Ia juga hanya 11 tembakan pertama pada satu mesin, diterangkan dalam pracetak syarikat yang belum disemak rakan sebaya, pada suhu kira-kira sepuluh kali di bawah apa yang diperlukan plasma terbakar, tanpa tenaga bersih, tanpa pulang modal, dan tanpa elektrik. Satu mekanisme ditunjukkan, bukan loji janakuasa dibina.

Sumber

S. J. Howard et al. (General Fusion), The science of compressional heating on the LM26 magnetized target fusion experiment, arXiv:2606.23974 [physics.plasm-ph] (2026)
https://arxiv.org/abs/2606.23974

General Fusion, 'General Fusion Achieves Compressional Plasma Heating with LM26 Magnetized Target Fusion Machine' (company announcement, June 2026)
https://generalfusion.com/post/general-fusion-achieves-compressional-plasma-heating-with-lm26-magnet

Nature news, 'Nuclear-fusion firm says plant will deliver electricity to grid - but big questions remain' (2026)
https://www.nature.com/articles/d41586-026-01795-z