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

Kerak pertama yang tipis dan setengah cair: model Hadean yang digerakkan tumbukan, bukan panas internal

Eon pertama Bumi, Hadean, hampir tidak meninggalkan rekaman batuan. Studi pemodelan ini menanyakan seperti apa kerak jika tumbukan tidak lagi diabaikan. Dengan model fluks tumbukan stokastik yang menurun dan simulasi aliran panas kerak serta mantel yang telah dibenchmark, para penulis menemukan bahwa panas tumbukan akan melampaui seluruh panas internal Bumi setidaknya satu orde besaran selama sebagian besar Hadean, meninggalkan kerak tipis (di bawah ~5 km) yang sebagian meleleh hanya beberapa kilometer di bawah permukaan — terlalu lemah, menurut mereka, untuk tektonik lempeng dan mudah didaur ulang kembali ke mantel, yang dapat menjelaskan mengapa begitu sedikit material Hadean bertahan. Ketika tumbukan mereda setelah ~3,9 Ga (sekitar 3,9 miliar tahun lalu), kerak benua yang bertahan dapat terbentuk, tepat ketika batuan felsik tertua yang masih ada muncul — 'kemungkinan bukan kebetulan', dalam kata-kata hati-hati para penulis. Karena mereka sengaja memakai pemanasan konservatif sebagai batas bawah, hasil kualitatifnya cukup kokoh meski angka pastinya belum tetap. Ini model yang kuat dan koheren tentang masa bayi Bumi — bukan observasi langsung terhadapnya.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Impact heating and the hidden Hadean*, Tim E. Johnson, Craig O'Neill, Simon Turner, Christopher L. Kirkland, Science (2026), 392:1408-1412 · DOI: 10.1126/science.aeb5402

Bab kisah Bumi yang nyaris tidak menyisakan halaman

Bumi adalah satu-satunya planet yang kita ketahui memiliki benua — daratan kaya silika dan ringan tempat kita semua hidup. Namun bagaimana benua pertama kali terbentuk masih menjadi salah satu masalah tertua yang belum terpecahkan dalam geologi, dengan alasan yang keras: hampir seluruh buktinya sudah hilang.

Eon pertama Bumi, Hadean, berlangsung sejak planet terbentuk hingga sekitar 4,03 miliar tahun lalu (Ga). Dari setengah miliar tahun pertama itu, hampir tidak ada yang bertahan. Batuan felsik utuh tertua — tipe batuan benua — berumur sekitar 4,03 Ga. Beberapa batuan basaltik langka mencapai ~4,2 Ga. Material tertua dari jenis apa pun hanyalah sejumlah kecil kristal zirkon — yang paling terkenal berasal dari Jack Hills, Australia Barat — bertanggal hingga 4,4 Ga. Itulah hampir seluruh arsip masa bayi Bumi: segelintir lokasi dan mineral seukuran butir pasir.

Studi ini tidak menambahkan batuan baru ke arsip tersebut. Ia melakukan sesuatu yang berbeda: membangun model fisik tentang seperti apa kerak Hadean jika mengikuti fisika tersebut, lalu mengajukan pertanyaan yang diabaikan kebanyakan model Bumi awal. Apa yang terjadi jika kita berhenti mengabaikan bahwa Bumi muda terus-menerus dibombardir?

Jawaban para penulis mencolok. Untuk sebagian besar Hadean, panas yang dibawa tumbukan akan jauh melampaui seluruh panas internal Bumi, sehingga kerak tetap tipis dan setengah meleleh — terlalu lemah, menurut mereka, untuk sesuatu yang menyerupai tektonik lempeng modern. Ini model, bukan ingatan geologis. Namun untuk sekali ini, modelnya benar-benar mencoba memasukkan kekerasan zaman yang hendak dijelaskan.

A model of the Hadean, not a memory of it

The logic is thermal: impacts heat, crust melts, the archive erases itself.

Energy

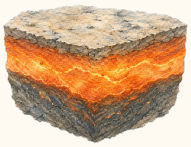
Impact heat dominates

At least an order of magnitude larger than internal heat for much of the Hadean.

Consequence

Thin, shallowly molten crust

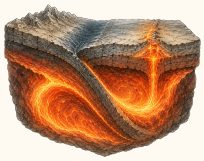
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



Around the 4.0-3.9 Ga transition, lasting crust appears.

Dalam model, panas tumbukan mendominasi anggaran energi, kerak tipis yang meleleh dangkal terus mendaur

ulang dirinya, dan kerak benua yang bertahan baru muncul sekitar transisi 4,0–3,9 Ga. Ini model Hadean, bukan rekaman langsung darinya.

The Clean Paper CC BY 4.0

Apa yang dilakukan para penulis

Tim menggabungkan tiga komponen yang biasanya dipisahkan.

Pertama, **model stokastik fluks tumbukan** — hujan asteroid dan benda lebih besar yang menghantam Tata Surya bagian dalam sepanjang Hadean dan awal Arkean. Yang penting, ini bukan gagasan lama tentang satu lonjakan "Late Heavy Bombardment". Fluksnya sangat kuat pada awalnya lalu **menurun seiring waktu**, dengan tumbukan besar datang secara acak (stokastik), bukan menurut jadwal tertentu. Model diskalakan ulang dari statistik tumbukan Bulan dan Tata Surya bagian dalam serta dipilih agar konsisten dengan spektrum usia zirkon dan bukti paleomagnetik yang tersedia.

Kedua, **simulasi geodinamika** tentang bagaimana panas bergerak melalui kerak dan mantel atas. Mereka memakai kode lattice-Boltzmann yang telah divalidasi terhadap tolok ukur Planet_LB, menjalankan baik perhitungan 1D sederhana suhu terhadap kedalaman maupun cuplikan konveksi mantel 2D penuh pada 4,1 Ga. Model memasukkan sumber panas internal biasa — peluruhan radioaktif dan panas dari inti — serta, yang penting, **adveksi magmatik**: panas yang dibawa ke atas oleh lelehan yang naik, sesuatu yang dihilangkan oleh banyak model termal kerak.

Ketiga, **pemodelan kesetimbangan fase** dari kerak awal yang realistis — metabasalt Hadean terhidrasi dari sabuk batuan hijau Nuvvuagittuq — untuk menentukan pada suhu dan kedalaman berapa batuan seperti itu mulai meleleh.

Satu pilihan metodologis penting untuk memahami makalah ini: para penulis sengaja menyusun asumsi yang justru *melawan* kesimpulan mereka sendiri. Mereka mengasumsikan mantel "nonchondritic" — dengan lebih sedikit material radioaktif penghasil panas dibanding acuan chondritic — sehingga pemanasan internal kurang dari setengah model standar, memakai laju pemanasan konservatif, dan mengabaikan pemanasan pasang surut dari Bulan muda yang saat itu lebih dekat. Artinya suhu kerak yang dihitung merupakan **nilai minimum** — batas bawah. Jika ada bias, Hadean sebenarnya mungkin lebih panas daripada model mereka.

Apa yang mereka temukan

Tumbukan, bukan panas internal, mendominasi anggaran energi Hadean. Ketika panas tumbukan diintegrasikan sepanjang waktu, kontribusinya jauh melampaui panas internal — setidaknya satu orde besaran untuk sebagian besar Hadean. Dalam gambaran ini, pemanasan akibat tumbukan, bukan peluruhan radioaktif, merupakan mesin utama yang menggerakkan tektonisme awal, dan baru turun menjadi faktor kecil setelah sekitar **3,9 Ga**.

Panas itu membuat kerak tetap tipis dan meleleh dangkal. Tanpa tumbukan dan adveksi lelehan, model menghasilkan kerak Hadean yang baru sebagian meleleh di bawah sekitar 10–15 km. Tambahkan panas tumbukan, dan zona leleh naik drastis: kerak sudah sebagian meleleh hanya **beberapa kilometer di bawah permukaan** (kira-kira di bawah 2–5 km). Pada kedalaman sekitar 5 km, model memprediksi lebih dari 30% lelehan — keadaan ketika batuan terlalu lemah untuk bertahan sebagai lempeng kaku. Pada 5–10 km, suhu ~1000–1100°C berarti kerak banyak meleleh hampir terlepas dari komposisinya. Kerak padat yang bertahan akan **tipis, kurang dari sekitar 5 km**.

Kerak setengah cair menghapus dirinya sendiri. Pelelehan luas memungkinkan material kaya besi dan magnesium yang lebih padat tenggelam dan terpisah, sementara lelehan kaya silika yang lebih ringan naik. Seiring waktu, proses ini mendorong komposisi rata-rata kerak menjadi lebih berevolusi dan kaya silika — sekaligus menghasilkan lelehan felsik yang dapat mengkristalkan zirkon. Hampir seluruh kerak tipis ini kemudian akan didaur ulang kembali ke mantel yang berkonveksi, konsisten dengan rekaman kimia isotop. Dalam model ini, hampir tidak adanya batuan Hadean bukan kekosongan dalam catatan — itu adalah *prediksi*. Batuan 4,2 Ga dan zirkon 4,4 Ga adalah penyintas langka dari kerak yang sebagian besar dihancurkan hampir secepat ia terbentuk.

Berakhirnya bombardemen bertepatan dengan munculnya benua yang bertahan. Ketika bombardemen mereda melewati transisi 4,0–3,9 Ga, kerak akhirnya dapat menebal dan bertahan. Batuan benua tertua yang masih ada muncul sekitar transisi yang sama. Para penulis mengatakannya dengan hati-hati: kemunculan kerak benua yang bertahan pada saat itu "kemungkinan bukan kebetulan".

Inferensi utama mereka: dalam kondisi tersebut — kerak tipis, meleleh hanya beberapa kilometer di bawah permukaan — **tektonik lempeng pada Hadean tidak masuk akal**.

Mereka juga menunjukkan mengapa penelitian sebelumnya mencapai kesimpulan berlawanan. Studi terdahulu mengenai tumbukan stokastik hanya menemukan efek kecil, dengan kurang dari 2,5% kerak meleleh pada suatu waktu. Studi itu meninggalkan dua hal yang dimasukkan penelitian ini: efek global tumbukan besar pada pelelehan jauh di dalam mantel, serta pengangkutan panas itu ke atas oleh magma yang naik. Ketika keduanya dikembalikan, gambaran termalnya berubah drastis.

Mengapa model bukanlah ingatan

Semua yang dijelaskan di atas merupakan keluaran simulasi, bukan pembacaan langsung dari batuan Hadean — karena batuan tersebut hampir semuanya sudah tidak ada. Itu tidak membuat hasilnya lemah, tetapi menentukan jenis hasil yang sedang kita baca.

Rantainya adalah: sebuah *model* fluks tumbukan memberi masukan ke *model* aliran panas mantel dan kerak, yang kemudian diperiksa terhadap *model* tentang cara suatu batuan tertentu meleleh. Setiap mata rantai memiliki dasar fisik dan, jika memungkinkan, divalidasi terhadap tolok ukur — tetapi keseluruhannya adalah argumen koheren mengenai seperti apa Hadean *seharusnya* menurut fisika yang masuk akal, bukan pengukuran tentang seperti apa Hadean *sebenarnya*.

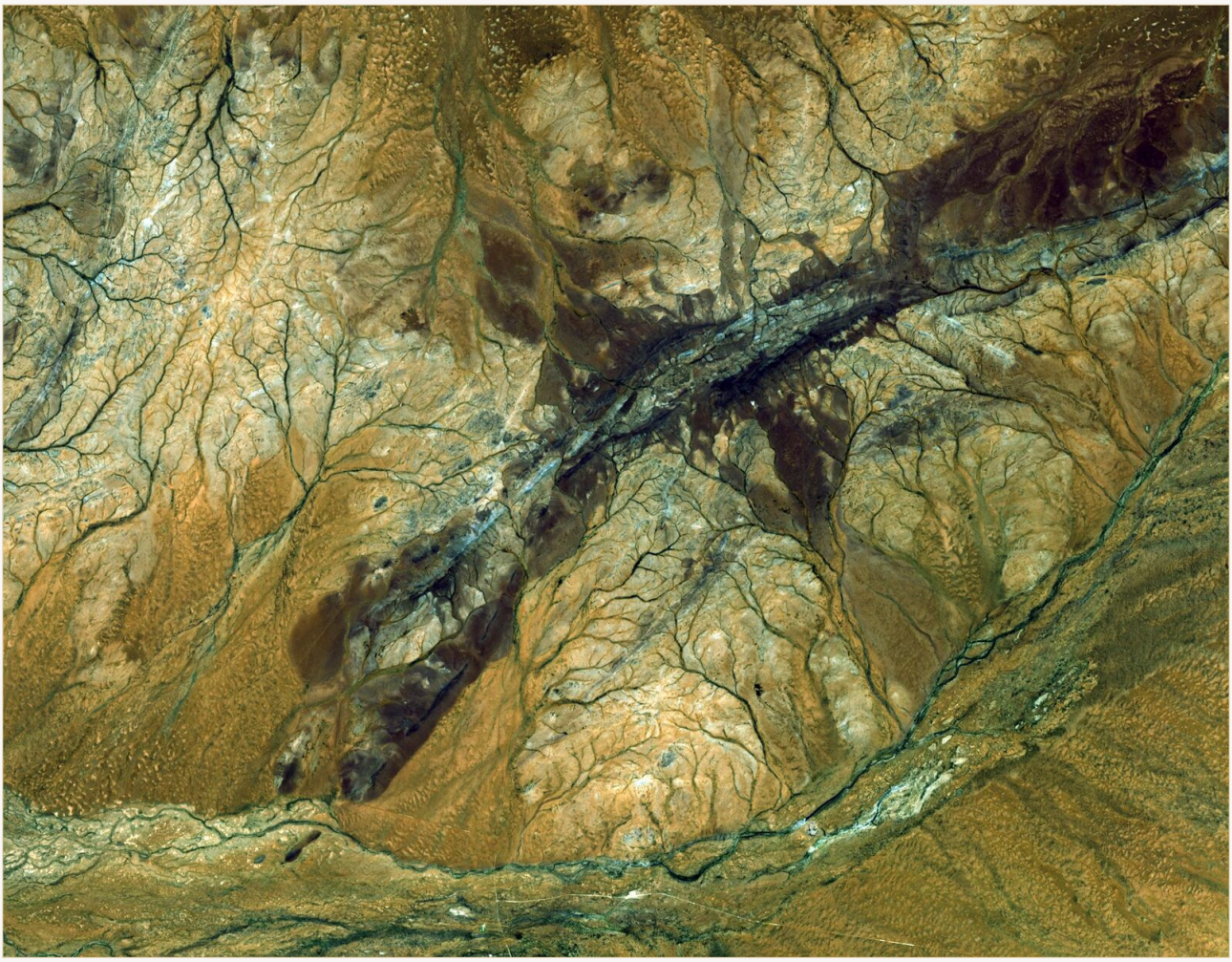
Karena itu asumsi konservatif para penulis lebih penting daripada yang tampak. Karena mereka memilih pemanasan sebagai batas bawah tetapi tetap mendapatkan kerak dangkal yang meleleh secara luas, kesimpulan kualitatif — kerak Hadean panas dan lemah — relatif kokoh terhadap pilihan mereka. Yang *tidak* ditentukan secara presisi adalah angkanya: geoterm yang tepat, fraksi leleh yang tepat, ketebalan kerak yang tepat. Baca arah hasilnya sebagai kuat; baca angka desimalnya sebagai sementara.

Apa yang *tidak* dibuktikan

- Studi ini **tidak** mengamati kerak Hadean secara langsung. Hampir tidak ada batuan dari era ini; hasilnya merupakan pemodelan tentang apa yang diimplikasikan fisika, bukan pengukuran.
- Studi ini **tidak** bergantung pada "Late Heavy Bombardment". Fluks tumbukan yang dipakai menurun dan bersifat stokastik — model tidak membutuhkan maupun memakai satu lonjakan bombardemen mendadak.
- Studi ini **tidak** menyelesaikan perdebatan tektonik lempeng. "Tidak masuk akal" di sini adalah inferensi yang kuat dan berlandaskan fisika, mendukung Bumi awal dengan *stagnant lid* atau *squishy lid* yang panas — tetapi mode tektonik Hadean masih benar-benar diperdebatkan.
- Studi ini **tidak** membuktikan tumbukan *menyebabkan* benua muncul sekitar transisi 4,0–3,9 Ga. Kesesuaian waktunya adalah asosiasi kuat yang oleh penulis disebut "kemungkinan bukan kebetulan" — bahasa hati-hati untuk korelasi yang menarik, bukan sebab-akibat yang telah dibuktikan.
- Zirkon Jack Hills **bukan** benua yang terawetkan. Itu butiran langka yang bertahan dan menunjukkan material felsik serta air sudah ada sejak dini; inti model justru bahwa kerak yang menghasilkan zirkon itu sebagian besar didaur ulang.
- Studi ini **tidak** merekonstruksi sejarah lengkap Bumi awal. Simulasinya diidealkan — profil 1D dan irisan ekuatorial 2D dengan tumbukan dibatasi dekat khatulistiwa, dalam bentuk cuplikan waktu — bukan model planet empat-dimensi lengkap.

Seberapa kuat buktinya?

Untuk klaim utama — bahwa pemanasan tumbukan merupakan kendali tingkat pertama pada kerak Hadean, membuatnya tipis dan meleleh dangkal — argumennya koheren dan, dalam satu pengertian penting, konservatif. Studi memakai kode geodinamika yang telah diuji, input yang masuk akal secara fisik, dan asumsi batas bawah, serta memasukkan sumber panas yang diabaikan banyak model terdahulu. Ia juga mendapat kredibilitas karena menjelaskan dua fakta sulit sekaligus: mengapa hampir tidak ada batuan lebih tua dari ~4 Ga yang bertahan (daur ulang hampir total), dan mengapa kerak yang bertahan muncul tepat ketika bombardemen mereda.



Jack Hills, Australia Barat, dilihat oleh instrumen ASTER milik NASA. Zirkon dari wilayah ini mencakup sebagian material tertua yang masih bertahan dari kerak awal Bumi — petunjuk kecil dari sebuah eon yang batuannya sebagian besar terhapus.

NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team fair-use

Batasnya sama jelas, dan memang merupakan batas semua model waktu sangat dalam: ini model di atas model, ditambatkan pada rekaman batuan yang sangat sedikit, dan kesimpulan yang paling mudah dikutip — "tektonik lempeng tidak masuk akal" — adalah inferensi, bukan observasi. Sikap yang tepat adalah memperlakukan ini sebagai hipotesis yang kuat dan beralasan baik yang membingkai ulang Hadean, lalu mengundang pengujian terhadap asumsinya — terutama pilihan model fluks tumbukan — bukan sebagai kasus yang sudah selesai.

Ringkasan paling berguna bukan "beginilah Hadean sebenarnya" dan bukan pula "ini cuma simulasi". Yang lebih tepat: dengan fisika yang masuk akal dan konservatif, Bumi awal di bawah bombardemen berat akan memiliki kerak tipis, setengah cair, dan mendaur ulang dirinya sendiri — dan satu gagasan itu menjelaskan cukup banyak dari sedikit hal yang masih dapat kita lihat.

Mengapa ini penting

Gambaran populer tentang Bumi awal cenderung berayun antara dua ekstrem: dunia berair yang tenang dengan tektonik lempeng hampir seperti sekarang, atau planet lava yang mengerikan. Penelitian ini menggambar jalan tengah yang spesifik dan berlandaskan fisika: kerak yang tipis dan berulang kali meleleh kembali hanya beberapa kilometer di bawah permukaan, terus dihancurkan dan dibentuk ulang, dengan tumbukan — bukan panas internal — yang menentukan kondisinya.

Pembingkaian ulang ini benar-benar berguna. Ia menawarkan satu mekanisme bagi dua fakta terbesar tentang masa bayi Bumi — hampir tidak adanya rekaman batuan dan waktu munculnya benua pertama yang bertahan — serta menempatkan proses yang biasanya diabaikan, pemanasan tumbukan, di pusat cerita. Jika bertahan terhadap pengujian, gagasan ini mengubah cara kita memikirkan kapan Bumi mulai menjadi planet dengan benua stabil, dan juga relevan bagi dunia berbatu lain yang terbentuk di bawah bombardemen mereka sendiri.

Semua itu tidak mengharuskan model ini menjadi kata terakhir. Model hanya perlu menjadi hipotesis yang cukup baik untuk diuji — dan dengan mengikat dirinya pada rekaman zirkon serta isotop yang masih ada, ia memenuhi syarat itu. “Hadean tersembunyi” dalam judul memang tepat: sebuah era yang hampir hanya dapat kita jangkau melalui pemodelan, karena era itu menghapus buktinya sendiri.

Singkatnya

Eon pertama Bumi, Hadean (sebelum ~4,03 Ga), hampir tidak meninggalkan rekaman batuan. Studi pemodelan ini menanyakan seperti apa kerak Bumi jika satu sumber panas yang biasanya diabaikan ikut dimasukkan: tumbukan. Dengan model fluks tumbukan stokastik yang menurun dan simulasi aliran panas kerak dan mantel 1D serta 2D yang telah divalidasi terhadap tolok ukur — termasuk panas yang dibawa lelehan naik — para penulis menemukan bahwa panas tumbukan yang terintegrasi sepanjang waktu akan melampaui seluruh panas internal Bumi setidaknya satu orde besaran selama sebagian besar Hadean. Akibatnya adalah kerak tipis (di bawah ~5 km) yang sebagian meleleh hanya beberapa kilometer di bawah permukaan dan, pada kedalaman ~5 km, meleleh lebih dari 30% — terlalu lemah untuk menopang tektonik lempeng, yang oleh penulis dinilai tidak masuk akal pada Hadean. Kerak seperti ini sebagian besar akan didaur ulang ke mantel, menjelaskan mengapa begitu sedikit material Hadean bertahan; ketika tumbukan mereda sepanjang transisi 4,0–3,9 Ga, kerak benua yang tahan lama dapat terbentuk, sekitar saat batuan felsik tertua yang masih bertahan muncul — “kemungkinan bukan kebetulan”. Karena para penulis sengaja menggunakan pemanasan konservatif sebagai batas bawah, hasil kualitatifnya cukup kokoh meski angka pastinya tidak tetap. Ini model yang kuat dan koheren tentang masa bayi Bumi — bukan observasi langsung terhadapnya.

Penilaian tanpa berlebihan

Apa yang ditunjukkan makalah: Dalam simulasi berlandaskan fisika yang memasukkan pemanasan akibat tumbukan dan transport panas magmatik, kerak Hadean menjadi tipis dan sebagian meleleh hanya beberapa kilometer di bawah permukaan, didominasi panas tumbukan alih-alih panas internal, sebagian besar didaur ulang ke mantel, dan — dalam model ini — tidak mampu menopang tektonik lempeng.

Apa yang masuk akal tetapi belum terbukti: Bahwa tumbukan adalah alasan benua yang bertahan muncul sekitar 3,9 Ga; bahwa Hadean merupakan dunia *stagnant lid* atau *squishy lid* alih-alih dunia dengan tektonik lempeng dini; bahwa hampir tidak ada batuan Hadean yang bertahan secara khusus karena kerak cair mendaur ulang dirinya.

Apa yang tidak ditunjukkan: Pengukuran langsung kerak Hadean; jawaban final atas perdebatan tektonik lempeng; hubungan sebab-akibat yang terbukti antara meredanya bombardemen dan benua pertama; bahwa zirkon Jack Hills mewakili benua yang terawetkan; model lengkap planet awal.

Keterbatasan utama: Rekaman batuan Hadean hampir tidak ada, sehingga hasil merupakan model yang dibatasi oleh data yang sangat sedikit; model ditumpuk di atas model (fluks tumbukan → geodinamika → kesetimbangan fase); fluks tumbukan sendiri merupakan pilihan representatif yang tidak pasti; simulasinya ideal (irisan ekuatorial 1D dan 2D, cuplikan waktu). Asumsi konservatif sebagai batas bawah memperkuat kesimpulan kualitatif tetapi tidak membuat geoterm spesifik menjadi presisi.

Seberapa besar keyakinan yang sebaiknya dimiliki pembaca umum? Tinggi bahwa, menurut fisika yang masuk akal, Bumi awal yang dibombardir berat akan memiliki kerak panas, tipis, dan meleleh dangkal. Sedang bahwa kondisi ini membuat tektonik lempeng Hadean tidak mungkin dan membantu menjelaskan hilangnya rekaman batuan. Rendah untuk klaim bahwa studi ini *membuktikan* bagaimana benua terbentuk atau kapan tepatnya — ini model kuat dan konservatif yang membingkai ulang Hadean, bukan pandangan langsung ke masa itu.

Sumber

Johnson, O'Neill, Turner & Kirkland, Science 392:1408-1412 (2026)
https://doi.org/10.1126/science.aeb5402