The Clean Paper

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

# Berapa lama Bumi boleh kekal hijau? Model iklim memberikan julat, bukan tarikh kiamat

*Dua puluh sembilan simulasi iklim tiga dimensi meletakkan had berbeza bagi biosfera fotosintetik Bumi antara kira-kira 1.35 dan 1.87 bilion tahun dari sekarang. Nilai itu bergantung pada laluan luluhawa batuan yang sengaja disederhanakan, haba, dan paras karbon dioksida terendah yang masih boleh digunakan tumbuhan. Ia tidak meramalkan bila semua tumbuhan, semua kehidupan, tamadun atau planet akan berakhir.*

---

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Matteo · Edited by Michele Renda · Figures by Cinzia Vaglio and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere*, Jacob Haqq-Misra and Eric Wolf, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026) · DOI: 10.1029/2025JD045586

# Berapa lama Bumi dapat tetap hijau? Sebuah model iklim memberi julat, bukan tarikh kiamat

Sebuah daun hidup di dalam kompromi yang sempit. Ia memerlukan cahaya, air, karbon dioksida, dan suhu yang masih dapat diterima oleh kimianya. Dalam julat hidup manusia, Matahari kelihatan seperti bahagian yang tetap dari kompromi itu. Dalam satu bilion tahun, tidak sedemikian.

Ketika Matahari menua di jujukan utama, ia perlahan-lahan menjadi lebih terang. Lebih banyak sinar Matahari menghangatkan Bumi, tetapi planet mempunyai respons jangka panjang: reaksi antara air hujan, karbon dioksida, dan batuan silikat dapat menyingkirkan karbon dioksida dari atmosfera. Ini melemahkan kesan rumah hijau dan mengimbangi sebahagian pemanasan. Namun respons yang sama yang mendinginkan planet pada akhirnya juga dapat mengurangkan karbon yang digunakan organisma fotosintetik untuk membina tisu hidup.

Sebuah makalah baru di Journal of Geophysical Research: Atmospheres bertanya had mana yang mungkin tiba lebih dahulu: terlalu panas, atau terlalu sedikit karbon dioksida. Jawapannya bukan tarikh ketika Bumi mati. Di sepanjang dua laluan masa depan yang sengaja disederhanakan, had yang diguna pakai untuk kehidupan fotosintetik berada antara kira-kira **1,35 dan 1,87 bilion tahun dari sekarang**.

Julat itu membincangkan **biosfera vegetatif**: bahagian daripada sistem kehidupan Bumi yang ditopang organisma fotosintetik, terutamanya tumbuhan dan kehidupan lain yang mengubah cahaya serta karbon dioksida menjadi bahan biologi. Ini bukan ramalan untuk setiap mikroba. Bukan umur tamadun manusia. Bukan umur planet.

## Termostat planet mempunyai dua tetapan yang tidak pasti

Ketidakpastian pusat adalah **luluhawa silikat**. Karbon dioksida larut dalam air hujan, bertindak balas dengan batuan silikat, lalu akhirnya dibawa ke lautan dan sedimen. Gunung berapi mengembalikan karbon dioksida pada skala masa geologis. Bersama-sama, proses ini membentuk bahagian dari kitaran karbonat-silikat, yang sering digambarkan sebagai termostat planet.

Dalam dunia yang lebih hangat dan basah, luluhawa mungkin semakin cepat dan menyingkirkan karbon dioksida dengan lebih cepat. Namun saintis tidak tahu sejauh mana kuatnya tindak balas ini akan mengendalikan Bumi di bawah Matahari masa depan yang lebih terang. Oleh itu Jacob Haqq-Misra dan Eric Wolf tidak memilih satu laluan yang dianggap benar. Mereka memodelkan dua **kes hujung**: kes ekstrem yang sengaja dipilih untuk mengehadkan ketidakpastian.

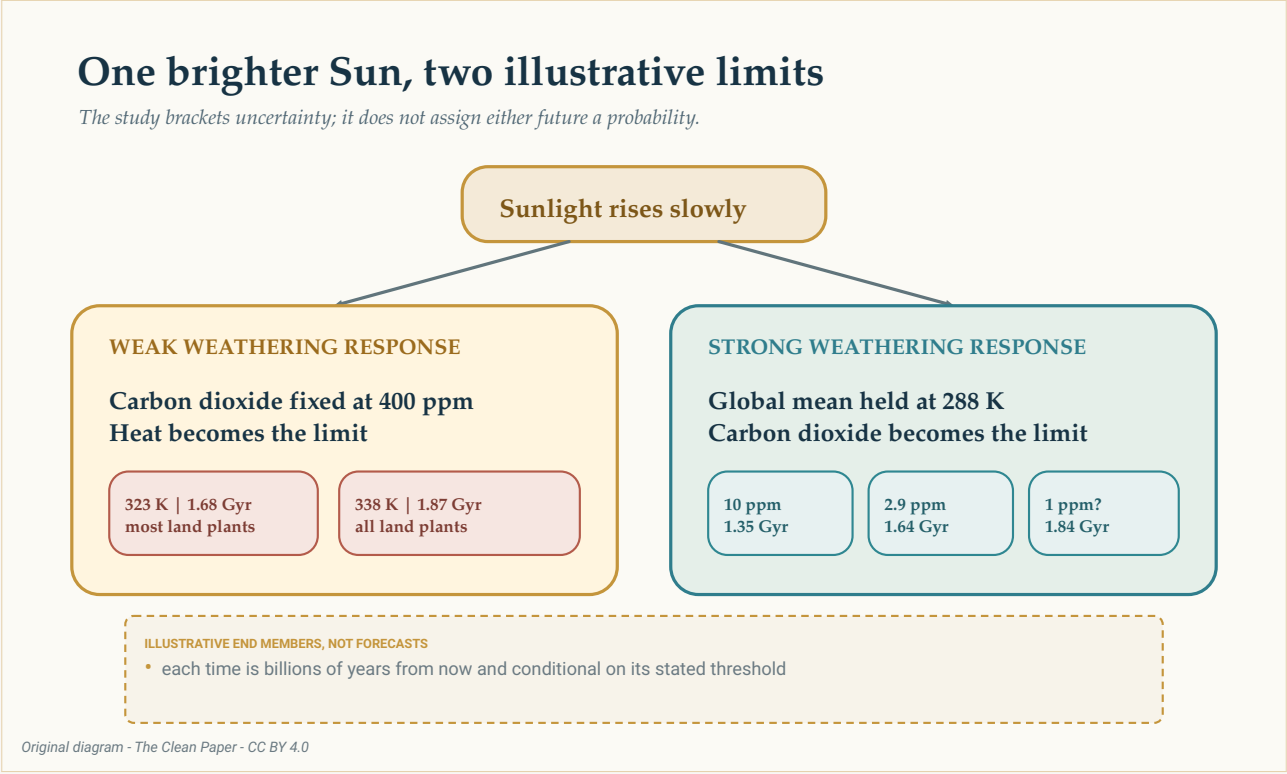
- Dalam **kes hujung luluhawa lemah**, karbon dioksida atmosfera tetap pada 400 bahagian per sejuta sementara Matahari yang makin terang menaikkan suhu.
- Dalam **kes hujung luluhawa kuat**, suhu purata global permukaan tetap 288 kelvin, sekitar 15 darjah Celsius, sementara karbon dioksida ditarik turun ketika sinar Matahari meningkat.

Tidak satu pun cabang disajikan sebagai masa depan Bumi yang sebenarnya. Yang pertama bertanya apa yang dilakukan panas jika karbon dioksida tetap tinggi. Yang kedua bertanya apa yang dilakukan kelaparan karbon jika luluhawa mengekalkan suhu purata global dekat nilai ketika ini.

### Bagaimana luluhawa dapat bertindak seperti termostat?

Analogi ini membincangkan maklum balas, bukan kenop kawalan literal. Ketika iklim yang lebih hangat mempercepat luluhawa kimia, lebih banyak karbon dioksida atmosfera dapat berakhir sebagai bahan terlarut, mineral, dan sedimen. Penghilangan gas rumah hijau ini melawan sebahagian pemanasan awal. Pada skala masa sangat panjang, pelepasan gas vulkanik mengembalikan karbon dioksida.

Kekuatan setiap mata rantai bergantung pada taburan hujan, batuan yang tersingkap, hakisan, biologi, tektonik dan kimia laut. Itulah sebabnya makalah menguji respons pengehad bukannya menganggap termostat sebagai mesin yang telah diketahui.




Makalah mengehadkan masa depan yang tidak pasti dengan dua kes hujung ilustratif. Jika luluhawa bertindak balas lemah, kenaikan panas mencapai ambang yang diguna pakai untuk tumbuhan darat. Jika bertindak balas kuat, penurunan karbon dioksida mencapai ambang fotosintesis yang diguna pakai. Ini adalah cabang model bersyarat, bukan kebarangkalian atau tarikh kiraan detik.

The Clean Paper CC BY 4.0

# Dua puluh sembilan dunia model yang telah mencapai keseimbangan, bukan satu filem sepanjang dua bilion tahun

Para penyelidik menggunakan ExoCAM, sebuah model iklim global tiga dimensi, untuk mengira **29 iklim keadaan mantap** di pelbagai gabungan sinaran Matahari yang lebih kuat dan karbon dioksida yang lebih rendah. Setiap kes dijalankan selama 70 tahun model. Di sini, satu tahun model adalah satu kitaran tahunan simulasi pada keadaan tetap: ini adalah masa pengkomputeran yang digunakan agar iklim buatan mencapai keadaan stabil, bukan satu langkah dalam ramalan tahun demi tahun masa depan Bumi. 20 tahun terakhir dipuratakan selepas iklim simulasi diberi masa untuk stabil.

Ke-29 kes itu adalah dunia model yang berasingan. Setiap larian model ialah satu titik pada grid, menjawab "iklim keseimbangan apa yang sesuai untuk pasangan sinar Matahari dan karbon dioksida ini?" Komputer tidak memulakan daripada Bumi hari ini lalu terus mengubah atmosfera, batuan, lautan, dan kehidupan selama dua bilion tahun seterusnya. Sebaliknya, para penulis menjejaki dua laluan luluhawa skematik melalui titik-titik yang telah dikira sebelum ini; laluan di antara titik tidak disimulasikan sendiri.

Jadual menghasilkan semula gabungan sinar Matahari dan karbon dioksida dalam arkib data model rasmi. ID kes adalah bantuan baca yang ditambahkan di sini mengikuti urutan arkib. **S/S0** adalah pemalar Matahari relatif: tenaga Matahari masuk yang digunakan dalam model dibahagi dengan nilai ketika ini, S0. Nilai 1,2 oleh itu bermakna tenaga Matahari masuk 20 peratus lebih besar daripada hari ini. **CO2 (ppm)** adalah nisbah campuran karbon dioksida atmosfera dalam molekul bagi setiap sejuta molekul atmosfera.

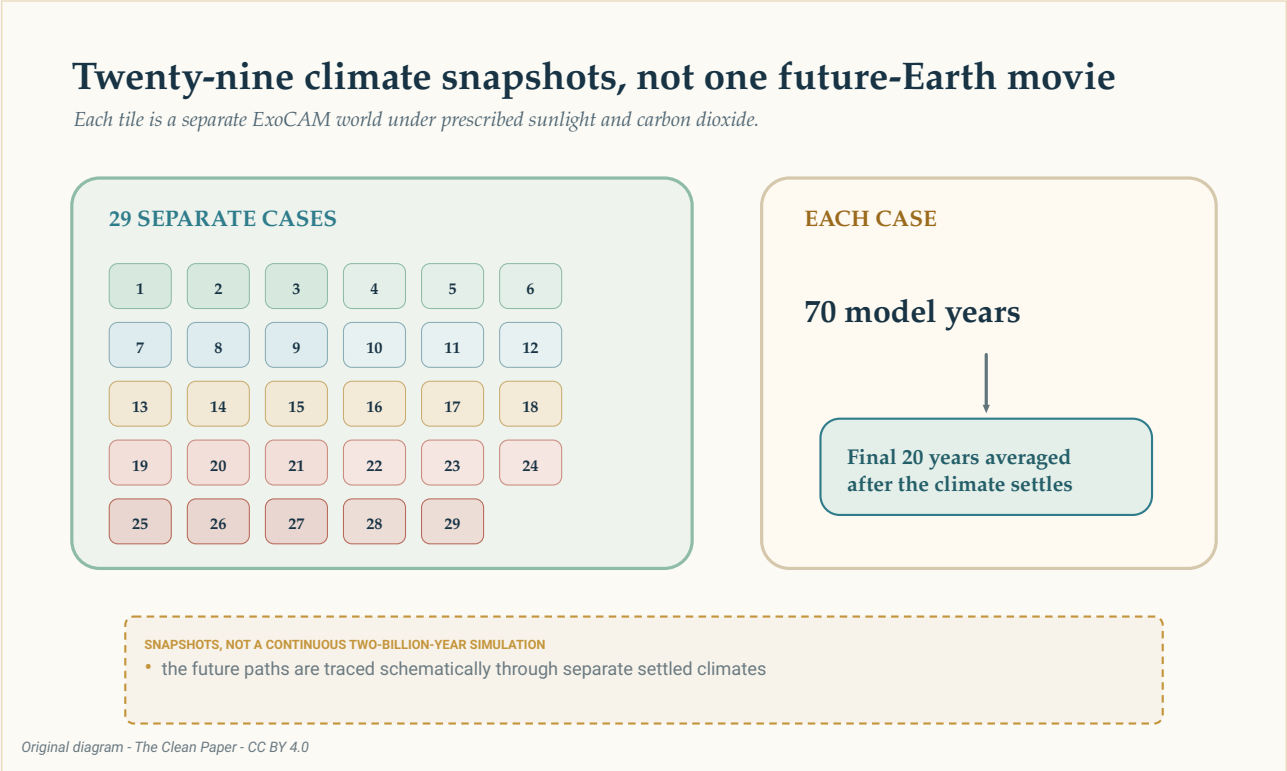
| ID kes | S/S0 | CO2 (ppm) |
|---:|---:|---:|
| 1 | 1.0 | 400 |
| 2 | 1.0 | 180 |
| 3 | 1.0 | 11.25 |
| 4 | 1.0 | 1.40625 |
| 5 | 1.044 | 400 |
| 6 | 1.044 | 180 |
| 7 | 1.044 | 135 |
| 8 | 1.044 | 11.25 |
| 9 | 1.044 | 1.40625 |
| 10 | 1.081 | 400 |
| 11 | 1.081 | 180 |
| 12 | 1.081 | 11.25 |
| 13 | 1.081 | 1.40625 |
| 14 | 1.091 | 400 |
| 15 | 1.091 | 180 |
| 16 | 1.091 | 34 |
| 17 | 1.091 | 11.25 |
| 18 | 1.091 | 1.40625 |
| 19 | 1.143 | 400 |

| ID kes | S/S0 | CO2 (ppm) |
|---|---|---|
| 20 | 1.143 | 180 |
| 21 | 1.143 | 11.25 |
| 22 | 1.143 | 6 |
| 23 | 1.143 | 1.40625 |
| 24 | 1.2 | 400 |
| 25 | 1.2 | 180 |
| 26 | 1.2 | 11.25 |
| 27 | 1.2 | 1.40625 |
| 28 | 1.2 | 0.45 |
| 29 | 1.2 | 0 |

Bumi dalam model masih dapat dikenali tetapi sengaja dihadkan. Ukurannya sama dengan Bumi dan menggunakan geografi masa kini. Model menggunakan lautan lapisan ringkas bukannya lautan dengan peredaran penuh, tekanan atmosfera kira-kira sama dengan nilai Bumi ketika ini (satu bar), dan metana tetap. Orbitnya benar-benar bulat (eksentrisiti sifar), dan paksi rotasinya tidak condong (kecondongan paksi sifar). Model tidak mempunyai tanah, vegetasi, atau maklum balas jelas dari biosfera yang berubah. Yang paling penting, model iklim tidak digandingkan secara dinamik ke model luluhawa batuan. Dengan kata lain, ExoCAM tidak mengira luluhawa, menggunakannya untuk membungkus kini karbon dioksida, lalu menjalankan iklim seterusnya dalam sebuah gelung maklum balas. Para penyelidik malah menetapkan dua laluan pengehad dan menelusurinya melalui grid 29 kes iklim.

**Apa makna “keadaan mantap” dalam model iklim?**

Kes keadaan mantap adalah iklim model yang dibiarkan stabil di bawah satu gabungan sinaran Matahari dan atmosfera. Cuaca tetap berubah dari hari ke hari dan tahun ke tahun di dalam simulasi, tetapi purata jangka panjangnya berhenti beralih dengan ketara.
Ini berguna untuk bertanya “iklim apa yang sepadan dengan keadaan ini?” perkara itu berbeza daripada meramalkan laluan tepat bagaimana Bumi nyata bergerak daripada satu keadaan ke keadaan seterusnya.




Setiap jubin adalah run iklim ExoCAM berasingan selama 70 tahun model, dengan 20 tahun terakhir dipuratakan. Kajian mengambil sampel 29 iklim keseimbangan pada keadaan sinar Matahari dan karbon dioksida yang ditetapkan; ia tidak mensimulasikan satu Bumi yang terus berevolusi selama dua bilion tahun.

The Clean Paper CC BY 4.0

# Kes hujung pertama: karbon dioksida mencukupi, haba terlalu tinggi

Dalam cabang luluhawa lemah, karbon dioksida tetap 400 bahagian per sejuta. Ketika input Matahari naik, panas menjadi faktor pengehad.

Makalah menggunakan dua ambang suhu purata global dari kajian sebelum ini:

- Pada **323 kelvin**, sekitar **50 darjah Celsius** sebagai purata tahunan global, dunia dianggap terlalu panas untuk sebahagian besar tumbuhan darat. Model mencapai ambang itu dalam sekitar **1,68 bilion tahun**.
- Pada **338 kelvin**, sekitar **65 darjah Celsius** sebagai purata tahunan global, dunia dianggap terlalu panas untuk semua tumbuhan darat. Model mencapai ambang itu dalam sekitar **1,87 bilion tahun**.

Ini adalah had biologi yang diguna pakai, bukan suhu universal di mana setiap organisma fotosintetik pasti gagal. Purata global juga menyembunyikan perbezaan besar antara rantau. Kajian secara berasingan memeriksa di mana gabungan suhu dan air mungkin tetap sepadan, tetapi label pada

peta iklim tidak dapat menginventarisasi setiap tempat perlindungan atau adaptasi masa depan.

## Kes hujung kedua: suhu masih boleh diterima, karbon dioksida terlalu sedikit

Dalam cabang luluhawa kuat, suhu purata global dipertahankan pada 288 kelvin, sekitar 15 darjah Celsius, sementara karbon dioksida atmosfera turun. Di sini jawapannya bergantung pada sejauh mana sedikit karbon yang mungkin digunakan laluan fotosintesis berbeza.

- Pada ambang tradisional **10 bahagian per sejuta** — 10 molekul karbon dioksida untuk setiap sejuta molekul atmosfera — had fotosintesis C4 tiba dalam sekitar **1,35 bilion tahun**. Fotosintesis C4 digunakan oleh tumbuhan termasuk jagung dan tebu, dan memusatkan karbon dioksida di sekitar enzim yang mengikat karbon.
- Dengan ambang C4 alternatif **2,9 bahagian per sejuta** yang dibahas dalam kajian sebelum ini, had itu beralih ke sekitar **1,64 bilion tahun**.
- Ambang sementara **1 bahagian per sejuta**, dikaitkan dengan kemungkinan bertahannya sebahagian tumbuhan CAM — tumbuhan yang menggunakan metabolisme asid Crassulacean, memisahkan pengambilan karbon dioksida pada malam hari dari penggunaannya pada siang hari — atau tumbuhan akuatik yang mampu menggunakan bikarbonat terlarut, menggeser had ke sekitar **1,84 bilion tahun**.

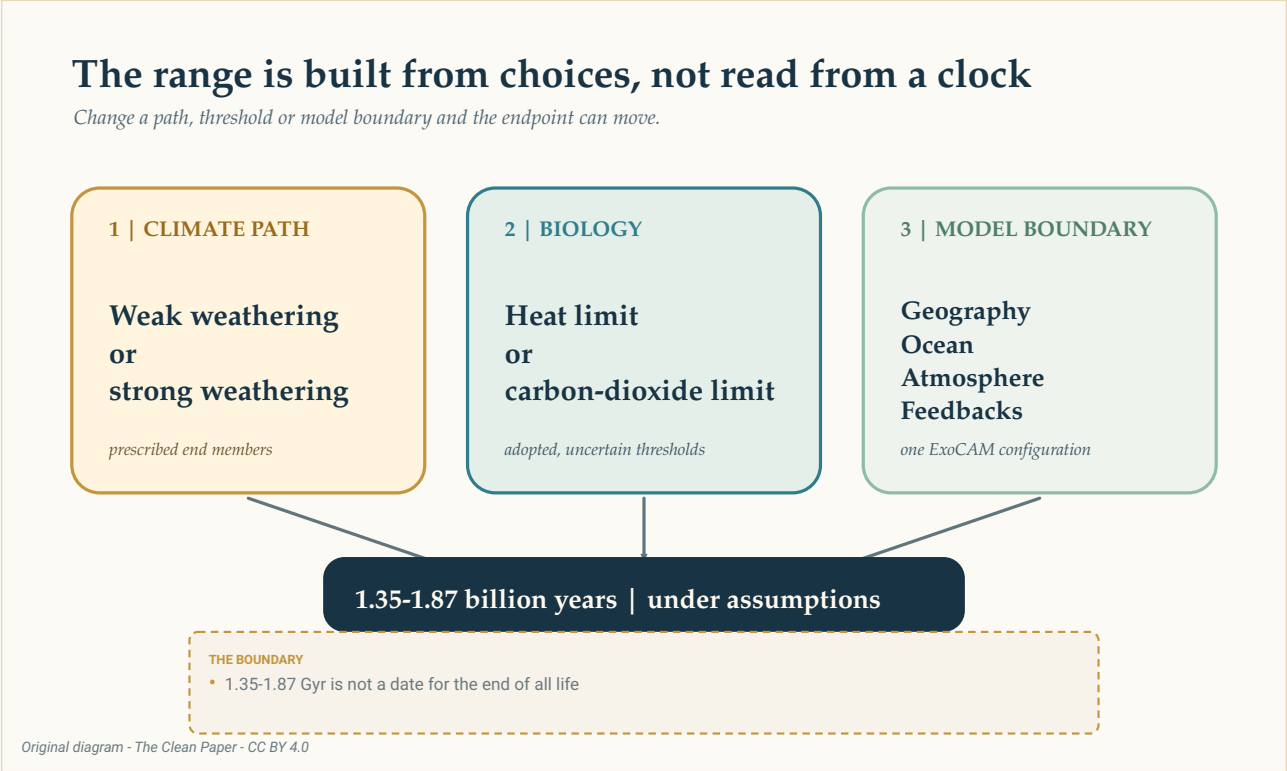
Angka terakhir membawa catatan biologi terbesar. Para penulis secara jelas menyatakan had satu-bahagian-per-sejuta sebagai sementara. Itu bukan ambang kelangsungan hidup yang telah dibuktikan secara eksperimen untuk semua tumbuhan CAM atau vegetasi akuatik dalam keadaan Bumi masa depan.

> **C3, C4, dan CAM adalah strategi, bukan tangga**
>
> Tumbuhan menggunakan laluan biokimia berbeza untuk menangkap karbon. **Fotosintesis C3** adalah yang paling umum. **Fotosintesis C4**, yang digunakan tumbuhan seperti jagung dan tebu, memusatkan karbon dioksida di sekitar enzim yang mengikat karbon dan dapat berfungsi lebih baik ketika karbon dioksida jarang. **Metabolisme asid crassulacean (CAM)** memisahkan pengambilan dan penggunaan karbon antara malam dan siang, membantu banyak tumbuhan menjimatkan air.
> Ini adalah keluarga strategi dengan banyak perbezaan antarspesies, bukan tingkatan berurutan tumbuhan yang "lebih baik." Ambang karbon dioksida yang sangat rendah dalam makalah adalah andaian untuk mengeksplorasi kemungkinan had, bukan jaminan bahawa ekosistem masa depan akan berevolusi untuk menggunakannya.

# Mengapa 1,86 bilion tahun bukan tarikh tamat tempoh

Anggaran utama makalah sekitar **1,86 bilion tahun** adalah purata daripada dua titik akhir atas yang optimistik: 1,84 bilion tahun pada cabang yang dihadkan karbon dioksida dan 1,87 bilion tahun pada cabang yang dihadkan panas. Ini adalah ringkasan ringkas daripada dua senario berbeza. Bukan hasil model ketiga dengan ketepatan lebih tinggi, dan bukan tarikh anggaran terbaik.

Malah julat lebih luas 1,35 hingga 1,87 bilion tahun tidak membawa satu kebarangkalian. Nilai bawah dan atasnya bergantung pada andaian luluhawa berbeza, ambang biologi berbeza, dan satu konfigurasi model iklim. Julat itu mengukur pilihan dalam eksperimen hampir sama besarnya dengan mengukur masa.




Julat 1,35 hingga 1,87 bilion tahun hanya muncul selepas memilih laluan luluhawa, ambang biologi, dan had model. Ini adalah peta andaian, bukan jam yang berakhir dengan kepupusan keseluruhan kehidupan.

The Clean Paper CC BY 4.0

# Had lain mungkin tiba lebih awal

Anggaran terpanjang untuk biosfera vegetatif menghampiri had lain yang berasingan dan tidak pasti: rumah hijau lembap atau runaway greenhouse yang dapat mendorong kehilangan sebahagian besar lautan. Model iklim sangat berbeza pendapat tentang bila keadaan itu dimulakan ketika sinar Matahari meningkat, terutamanya jauh dari keadaan masa kini. Beberapa anggaran menempatkannya sebelum had fotosintesis paling optimistik.

Ertinya, cabang atas tidak dapat dibaca sebagai janji bahawa Bumi akan mengekalkan lautan, benua yang biasa, atau keadaan permukaan boleh didiami hingga 1,87 bilion tahun dari sekarang. Model juga tidak merangkumi tektonik plat masa depan, perubahan keluasan daratan, ekosistem yang berevolusi, atau lautan yang sepenuhnya dinamik. Perhitungannya tentang bagaimana atmosfera menyerap dan memancarkan tenaga juga didorong ke rejim sinar Matahari intensif dan karbon dioksida amat rendah, tempat pelbagai model mulai menyimpang.

Adaptasi evolusioner dan intervensi teknologi muncul dalam pembahasan makalah sebagai kemungkinan. Kedua-duanya bukan keluaran dari 29 simulasi iklim. Model tidak menunjukkan organisma masa depan berevolusi dengan laluan fotosintesis satu-bahagian-per-sejuta, dan tidak menunjukkan tamadun mengelola atmosfera selama satu bilion tahun.

## Ini bukan hasil tentang krisis iklim semasa

Peningkatan kecerahan Matahari berfungsi selama ratusan juta hingga berbilion-bilion tahun. Pemanasan moden akibat manusia berasal daripada peningkatan pesat gas rumah hijau selama dekad dan abad. Kedua-duanya adalah pemaksaan berbeza, pada skala masa yang sangat berbeza, dan menjawab persoalan berbeza.

Tiada dalam kajian ini yang melemahkan bukti perubahan iklim ketika ini atau menjadi hujah untuk menunda tindakan. Biosfera yang mungkin mengekalkan sebahagian kehidupan fotosintetik di bawah satu senario model masa depan yang sangat jauh tidak sama dengan iklim tempat masyarakat dan ekosistem hari ini tetap selamat.

Makalah ini berharga kerana membuat persoalan yang sangat jauh menjadi lebih disiplin. Ia menunjukkan bahawa model terdahulu yang lebih ringkas mungkin terlalu banyak memanaskan ketika sinar Matahari meningkat sementara karbon dioksida tetap, dan bahawa kehidupan fotosintetik mungkin mempunyai lebih banyak laluan untuk bertahan daripada satu ambang karbon kanonik. Ia juga menunjukkan mengapa setiap tambahan pecahan satu bilion tahun datang bersama rantai andaian.

Matahari yang memberi makan sebuah daun perlahan-lahan berubah. Adakah Bumi tetap hijau selama 1,35, 1,87, atau angka lain dalam berbilion-bilion tahun akan bergantung pada batuan, air, atmosfera, dan kehidupan yang bertindak balas bersama. Hasil yang jujur bukan sebuah tarikh. Ia adalah pandangan yang lebih luas atas kompromi itu.

## Ringkasan utama

Sebuah kajian iklim tiga dimensi bertanya berapa lama biosfera vegetatif — fotosintetik — Bumi dapat bertahan ketika Matahari perlahan-lahan menjadi lebih terang. Para penyelidik mengira 29 iklim keadaan mantap berasingan dan menjejaki dua kes hujung ilustratif melalui hasil tersebut. Dengan luluhawa lemah dan karbon dioksida tetap 400 bahagian per sejuta, had panas yang diguna pakai

untuk tumbuhan darat berlaku sekitar 1,68 dan 1,87 bilion tahun dari sekarang. Dengan luluhawa kuat dan suhu purata global tetap 288 kelvin, sekitar 15 darjah Celsius, had karbon dioksida yang diguna pakai untuk fotosintesis berlaku sekitar 1,35, 1,64 dan, dengan ambang sementara, 1,84 bilion tahun. Angka 1,86 bilion tahun yang sering dipetik hanyalah purata yang dibundarkan daripada dua titik akhir atas yang optimistik. Ini adalah julat model yang bergantung pada senario, bukan tarikh ketika Bumi, manusia, atau keseluruhan kehidupan akan berakhir. Model menggunakan laluan yang ditetapkan, geografi masa kini, lautan lapisan ringkas, dan tanpa gandingan jelas tanah–vegetasi atau iklim–luluhawa, sementara anggaran terpanjang menghampiri had rumah hijau dan kehilangan lautan yang tidak pasti.

## Semakan tanpa sensasi

**Apa yang ditunjukkan makalah:** Dalam konfigurasi ExoCAM ini, iklim tiga dimensi umumnya memanas lebih sedikit di bawah kenaikan sinar Matahari dan karbon dioksida tetap berbanding model ringkas yang digunakan sebagai pembanding. Di antara dua kes hujung luluhawa yang ditetapkan dan beberapa ambang biologi yang diguna pakai, had biosfera vegetatif berada antara kira-kira 1,35 dan 1,87 bilion tahun dari sekarang.

**Apa yang munasabah tetapi belum ditetapkan:** Bahawa sebahagian tumbuhan CAM atau tumbuhan air yang menggunakan bikarbonat terlarut dapat mengekalkan fotosintesis dekat satu bahagian per sejuta karbon dioksida atmosfera; bahawa adaptasi atau teknologi dapat memperpanjang kehidupan fotosintetik lebih jauh; dan bahawa laluan iklim-luluhawa nyata akan tetap berada di antara dua kes hujung model.

**Apa yang tidak ditunjukkannya:** Tarikh tetap untuk akhir keseluruhan tumbuhan, keseluruhan kehidupan, tamadun manusia, lautan Bumi, atau planet; satu simulasi berterusan untuk dua bilion tahun ke depan; atau alasan apa-apa untuk meremehkan perubahan iklim akibat manusia ketika ini.

**Had utama:** Dua puluh sembilan kes keadaan mantap daripada satu keluarga model iklim; laluan luluhawa yang ditetapkan bukannya digandingkan dinamik; geografi masa kini; lautan lapisan ringkas; metana tetap; kecondongan paksi dan eksentrisiti sifar; tanpa tanah, vegetasi, atau maklum balas biosfera jelas; ambang panas dan karbon dioksida yang tidak pasti; dan perbezaan besar antar-model dekat keadaan moist dan runaway greenhouse.

**Sejauh mana pembaca umum patut yakin?** Tinggi bahawa kajian memperluas julat model yang munasabah dan mengenal pasti andaian yang mengendalikannya. Sedang terhadap julat numerik sebagai bracket yang berguna di dalam model ini. Rendah terhadap tarikh tepat apa-apa, kerana titik akhir terjauh bergantung pada laluan iklim yang sengaja ekstrem dan biologi yang tidak pasti.

# Sumber

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026)
https://doi.org/10.1029/2025JD045586

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere: Model Data, Zenodo record 16584870
https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870