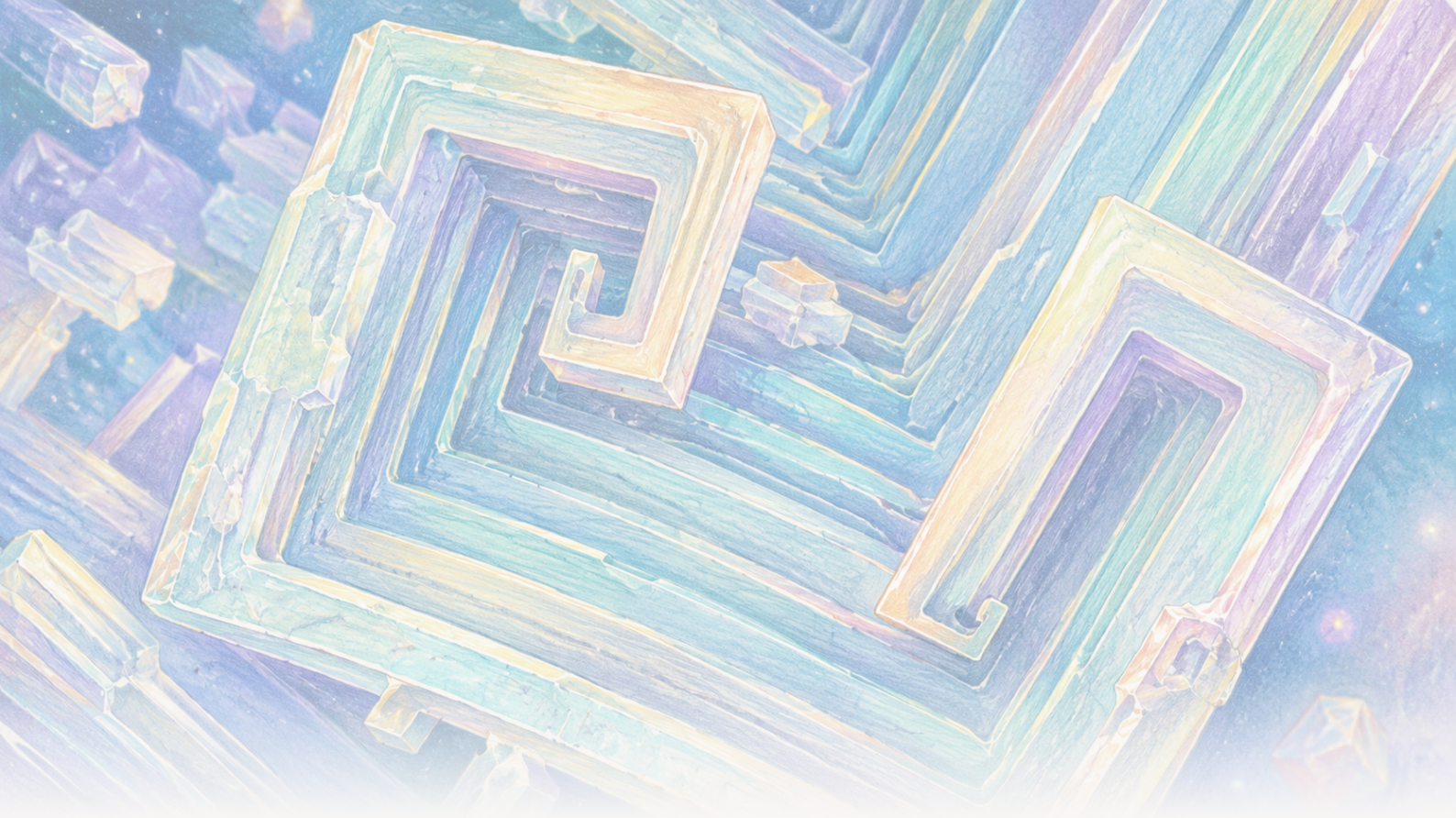


The Clean Paper

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

Di orbit, garam meja membentuk kubus berongga. Gravitasi mengubah larutan garam, bukan garamnya

Kristal natrium klorida yang ditumbuhkan di Stasiun Luar Angkasa Internasional mencakup kubus berongga bertingkat berukuran 2 hingga 8 milimeter. Makalah-makalah tersebut mendukung penjelasan berbasis transport: pengendapan biasa dan aliran akibat gaya apung sangat ditekan, sementara difusi mendominasi pertumbuhan awal. Kisinya tidak berubah menjadi bentuk garam baru, dan eksperimen ini tidak menetapkan suatu proses industri.

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

Paper: *Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions*, Donald Pettit and Pietro Fontana, npj Microgravity 5, 25 (2019) · DOI: 10.1038/s41526-019-0085-0

Di orbit, garam meja biasa tumbuh menjadi kubus berongga bertingkat

Kristalnya tampak seperti karya arsitektur: bingkai persegi bersarang di dalam bingkai persegi lain, dengan permukaan yang cekung membentuk tangga.

Kristal itu terbuat dari natrium klorida biasa, senyawa yang sama dengan garam meja. Hal yang tidak biasa bukanlah bahannya. Yang berbeda adalah larutan garam di sekelilingnya.

Di Bumi, kristal yang sedang tumbuh di dalam volume cairan berskala sentimeter dapat tenggelam, menyentuh dinding atau permukaan, dan ikut menciptakan perbedaan kerapatan yang mengedarkan larutan. Di Stasiun Luar Angkasa Internasional, pengendapan biasa dan aliran yang digerakkan oleh gaya apung sangat ditekan. Beberapa kristal garam tetap tersuspensi cukup lama untuk tumbuh perlahan dan lebih simetris menjadi **kubus hopper** dengan panjang rusuk antara 2 dan 8 milimeter.

Tiga makalah, yang diterbitkan pada 2011, 2015, dan 2019, menggambarkan eksperimen-eksperimen ini. Bersama-sama, ketiganya memberi pelajaran yang jernih tentang fisika transport: mengubah cara zat terlarut mencapai sebuah kristal dapat mengubah bentuk yang terlihat tanpa mengubah struktur atomiknya.

Eksperimen ini tidak menunjukkan bahwa ruang angkasa menghasilkan kristal sempurna, tidak menetapkan suatu proses industri, dan tidak mengungkap jenis garam baru.

Apa yang membuat sebuah kubus menjadi hopper

Kristal natrium klorida normal memiliki susunan atom berbentuk kubik. **Kristal hopper** tetap bersifat kubik, tetapi sudut dan rusuknya tumbuh lebih cepat daripada bagian tengah permukaannya. Hasilnya adalah cekungan berongga bertingkat pada setiap sisi, seolah-olah kubus membangun rangkanya terlebih dahulu sebelum mengisi dindingnya.

Contoh ISS yang lebih baru memperlihatkan pola pertumbuhan tersebut dengan jelas, tetapi contoh ini hanya merupakan konteks dan bukan bukti dari tiga makalah natrium klorida. Gambar dan time-lapse karya Donald Pettit di bawah menunjukkan **kalium klorida**, garam yang berbeda, yang membentuk morfologi hopper bertingkat dan berbentuk gulungan dalam mikrogravitasi.

[figure_pair pending]

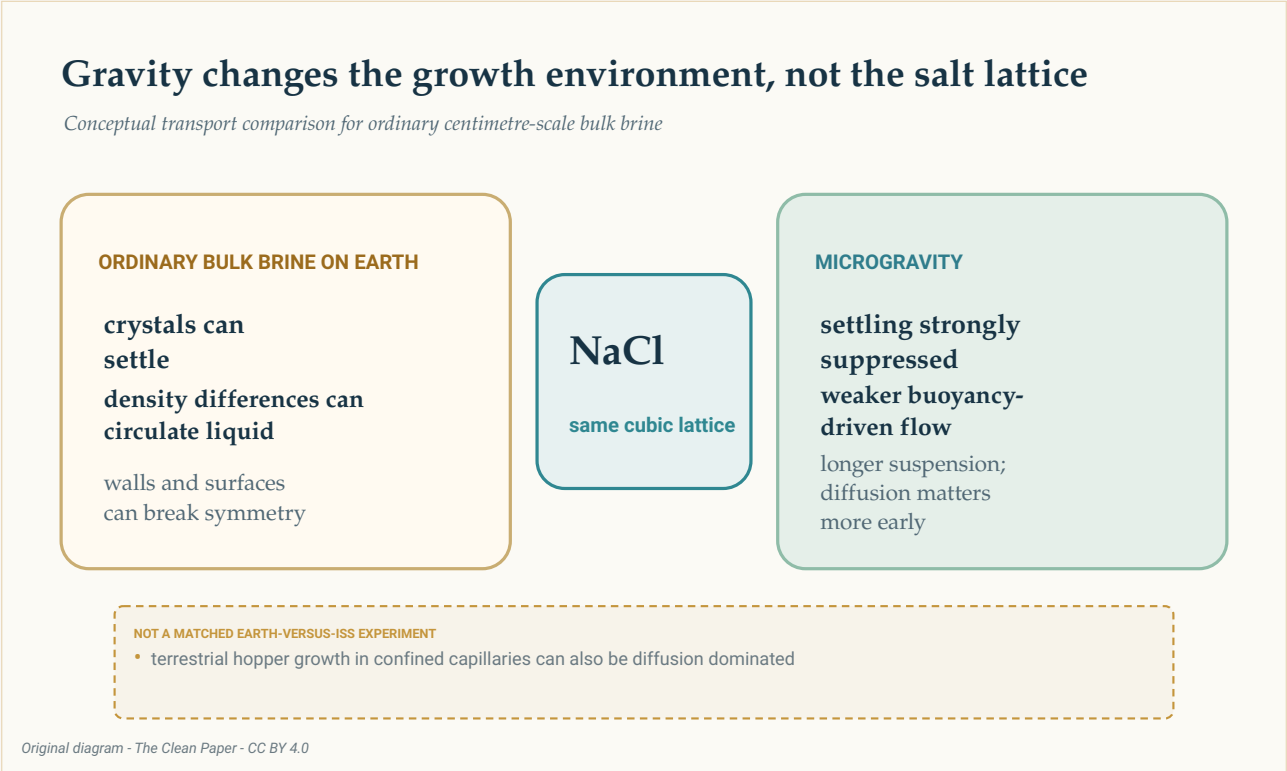
Dua mikrograf elektron pemindaian kristal hopper kalium klorida berbentuk gulungan yang ditumbuhkan di ISS. Gambar yang lebih baru ini merupakan contoh kontekstual morfologi, bukan sampel natrium klorida atau pengukuran dari studi 2011, 2015, atau 2019 yang dibahas dalam artikel ini.

[video pending]

Time-lapse yang lebih baru tentang pertumbuhan hopper kalium klorida di dalam lapisan air tipis dalam mikrogravitasi. Ini menggambarkan pertumbuhan pada rusuk dan sudut, bukan eksperimen atau data natrium klorida yang dianalisis dalam artikel ini.

Kristal tumbuh dari **larutan garam lewat jenuh**: air garam yang mengandung natrium klorida terlarut lebih banyak daripada yang dapat dipertahankan pada kesetimbangan dalam kondisi tersebut. Ion natrium dan klorida harus bergerak melalui cairan dan bergabung dengan permukaan kristal.

Secara umum ada dua cara untuk memindahkannya. **Difusi** adalah gerak molekuler acak yang membawa zat terlarut mengikuti perbedaan konsentrasi tanpa sirkulasi cairan secara massal. **Konveksi** adalah pergerakan cairan itu sendiri. Dalam gravitasi biasa, perbedaan kecil suhu atau konsentrasi dapat mengubah kerapatan dan mendorong sirkulasi akibat gaya apung. Kristal juga dapat **mengendap**, atau turun melalui cairan.



Perbandingan konseptual menunjukkan kisi natrium klorida yang sama di kedua lingkungan. Larutan garam curah biasa di Bumi dapat melibatkan pengendapan, sirkulasi akibat gaya apung, dan kontak dengan permukaan; mikrogravitasi sangat menekan dua proses pertama, memungkinkan suspensi lebih lama dan membuat difusi lebih penting pada tahap awal pertumbuhan. Ini bukan eksperimen Bumi-versus-ISS dengan kondisi yang dicocokkan.

The Clean Paper CC BY 4.0

Eksperimen ini dilakukan di Stasiun Luar Angkasa Internasional, laboratorium mikrogravitasi yang mengorbit. Istilah **mikrogravitasi** bukan berarti tanpa gravitasi. Makalah 2019 melaporkan percepatan sisa sekitar 1,2 juta bagian dari gravitasi permukaan Bumi, atau 1,2 mikro-g, disertai gerakan cairan siklik yang lambat. Lingkungan itu mengubah keseimbangan transport; ia tidak membuat larutan garam benar-benar diam.

Jalur lambat menuju kubus berskala milimeter

Studi 2019 berfokus pada kubus hopper yang tumbuh ketika air menguap dari larutan garam di ISS. Panjang rusuk kubus yang dilaporkan berkisar antara **2 hingga 8 milimeter**. Laju pertumbuhan berkisar antara **0,34 hingga 1,0 mikrometer per menit** (sekitar **0,49 hingga 1,44 milimeter per hari**), dengan rata-rata **0,68 mikrometer per menit** dan simpangan baku 0,23.

Pada laju rata-rata tersebut, rusuk sepanjang 8 milimeter akan memerlukan kira-kira satu minggu untuk berkembang. Perhitungan ini adalah estimasi, bukan pengukuran time-lapse untuk setiap tahap dari satu kristal tertentu.

Para penulis memperkirakan tingkat lewat jenuh di bawah **1,002**. Literatur pembanding di Bumi yang mereka gunakan menggambarkan pertumbuhan hopper pada lewat jenuh jauh lebih tinggi, di atas 1,45, dengan laju 10 hingga 110 mikrometer per detik selama hitungan detik atau menit, biasanya menghasilkan kubus lebih kecil dari 250 mikrometer.

Perbandingan tersebut informatif, tetapi tidak dicocokkan secara langsung. Kristal ISS dan literatur terestrial tidak berasal dari lengan eksperimen Bumi dan orbit yang dijalankan secara simultan dan identik oleh tim yang sama. Perbedaan wadah, antarmuka, dan metode dapat berpengaruh di samping gravitasi.

Karena itu, kontras yang paling kuat bersifat deskriptif: dalam pengamatan ISS ini, kubus hopper tumbuh perlahan, pada lewat jenuh rendah, selama berhari-hari hingga berminggu-minggu, dan mencapai skala milimeter.

Difusi mendominasi di awal; aliran kemudian masih mungkin terjadi

Makalah 2019 menggunakan **bilangan Peclet** untuk membandingkan transport akibat gerakan cairan dengan transport akibat difusi. Nilai di bawah satu berarti difusi lebih penting; nilai di atas satu berarti gerakan massal cairan mungkin mendominasi.

> **Sebuah rasio, bukan sakelar**
>
> Bilangan Peclet adalah perbandingan antara dua laju transport. Ia tidak membagi dunia menjadi cairan yang benar-benar diam di bawah satu dan konveksi murni di atas satu. Di sini nilainya berubah sesuai ukuran kristal dan estimasi kecepatan larutan garam di sekelilingnya. Kristal terkecil jelas berada dalam rezim yang didominasi difusi; kristal terbesar di wadah yang lebih besar dapat memasuki rezim di mana gerakan cairan yang lambat ikut berpengaruh.

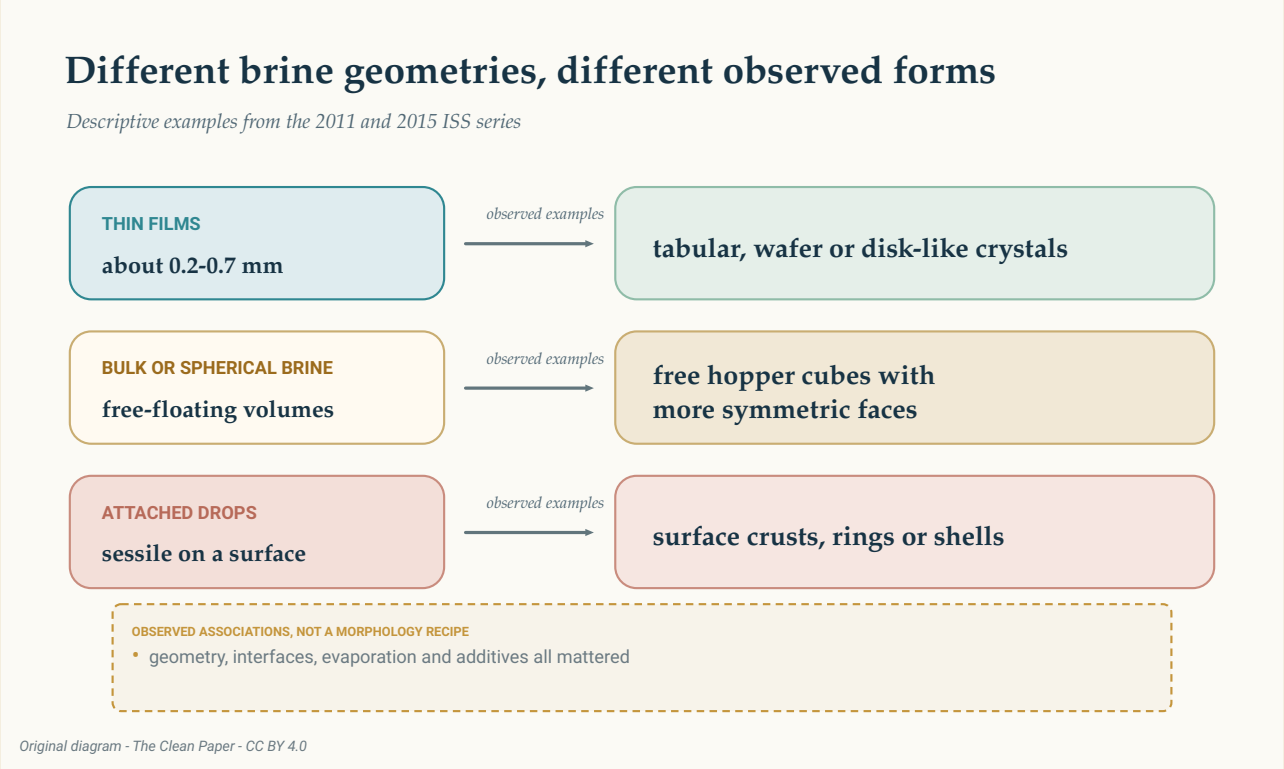
Dalam tetesan yang lebih kecil, berukuran kira-kira 0,8 sentimeter, estimasi bilangan Peclet meningkat dari sekitar **0,0004** dekat tahap nukleasi menjadi sekitar **0,03** pada ukuran akhir yang diukur. Difusi tetap dominan.

Dalam kristalisator berukuran 2 hingga 3 sentimeter, estimasi meningkat dari sekitar **0,05** untuk inti 50 mikrometer menjadi sekitar **4** untuk rusuk 4 milimeter. Pertumbuhan awal masih didominasi difusi, tetapi gerakan siklik yang lambat mungkin ikut berkontribusi pada tahap selanjutnya.

Inilah sebabnya pernyataan “mikrogravitasi menghilangkan konveksi” akan keliru. Sirkulasi biasa akibat gaya apung dan pengendapan sangat dikurangi. Percepatan sisa dan gerakan yang dapat diukur tetap ada.

Bentuk cairan juga berpengaruh

Makalah 2011 dan makalah 2015 memperluas gambaran tersebut. Keduanya melaporkan kristalisasi garam dalam lapisan tipis, lapisan cairan yang lebih tebal, volume larutan garam yang kurang lebih bulat, dan tetesan yang menempel pada suatu permukaan.



Tiga baris merangkum contoh yang diamati dalam keseluruhan dossier: lapisan tipis dengan bentuk tabular atau menyerupai cakram, larutan garam curah atau berbentuk bulat dengan kubus hopper bebas, serta tetesan yang menempel dengan kerak, cincin, atau cangkang. Hubungan ini bersifat deskriptif, bukan resep atau jaminan.

The Clean Paper CC BY 4.0

Dalam studi 2011, lapisan tipis setebal kira-kira 0,2 hingga 0,7 milimeter menghasilkan kepingan tipis dan kristal tabular. Volume larutan garam yang mengambang bebas memungkinkan sisi lateral yang lebih simetris dan kubus hopper.

Pengamatan 2015 mencakup lembaran tipis setebal 0,2 hingga 0,7 milimeter, lapisan lebih tebal

sekitar 4 hingga 6 milimeter, dan tetesan hemisferis yang menempel dengan lebar kira-kira 20 hingga 32 milimeter. Bentuk yang dilaporkan mencakup hopper tabular, kubus, kristal menyerupai cakram, dendrit, cincin, dan cangkang. Penambahan polietilena glikol menekan pertumbuhan hopper dalam salah satu rangkaian pengamatan.

Para penulis menggambarkan pekerjaan 2015 sebagai pengamatan yang dilakukan menggunakan persediaan yang tidak didaftarkan secara khusus selama waktu bebas awak, bukan penyelidikan terprogram yang ketat. Contoh-contoh ini menunjukkan bahwa geometri cairan, antarmuka, penguapan, dan bahan tambahan semuanya berpengaruh. Mereka tidak menetapkan resep deterministik di mana satu bentuk wadah menjamin satu bentuk kristal.

Kisi kristalnya tidak berubah menjadi bentuk garam baru

Perbedaan antara **struktur kristal** dan **morfologi** sangat penting.

Struktur adalah susunan atom berulang. Morfologi adalah bentuk luar yang terlihat. Difraksi neutron dalam makalah 2011 tidak menemukan struktur natrium klorida yang berubah ataupun perubahan parameter sel kisi dibandingkan dengan sampel terestrial. Sampel orbital juga mengandung **inklusi larutan garam**, yaitu kantong-kantong kecil larutan yang terperangkap di dalam kristal.

Jadi, penampilan yang besar dan simetris bukanlah bukti bahan yang lebih murni atau bebas cacat. Tidak satu pun makalah dalam dossier ini melaporkan kemurnian kimia yang lebih tinggi, kinerja mekanis yang lebih baik, atau kesesuaian untuk perangkat tertentu.

Gravitasi bekerja secara tidak langsung. Ia mengubah pengendapan, sirkulasi cairan, orientasi, dan kontak dengan permukaan. Ia tidak mengubah kekuatan ikatan natrium-klorida atau menciptakan fase atomik baru.

Apa yang dapat dan tidak dapat diajarkan oleh eksperimen ini

Makalah-makalah tersebut mendukung penjelasan berbasis transport: penekanan kuat terhadap pengendapan biasa dan aliran yang digerakkan gaya apung memungkinkan beberapa kristal tetap tersuspensi dan tumbuh perlahan dalam kondisi yang lebih simetris. Ukuran, laju, dan bentuk yang diukur merupakan pengamatan langsung; tingkat lewat jenuh, riwayat pertumbuhan, dan bilangan Peclet mencakup estimasi; perbandingan dengan Bumi sebagian berasal dari eksperimen lain yang telah diterbitkan.

Tidak ada satu penyebut tunggal yang rapi untuk keseluruhan dossier. Dossier ini menggabungkan kristal individual, kristalisator, dan contoh terpilih dari tiga makalah. Menjumlahkannya menjadi satu total akan memberi kesan adanya satu eksperimen seragam yang sebenarnya tidak pernah ada.

Studi-studi ini juga tidak melaporkan bukti yang diperlukan untuk klaim manufaktur. Tidak ada pengukuran throughput, biaya produksi, penggunaan energi, hasil, keandalan, atau kinerja material yang berguna. Rangkaian 2015 bersifat eksploratif. Perbandingan dengan eksperimen di Bumi bukan kontrol yang dicocokkan. Dan besar atau menarik secara visual tidak sama dengan lebih baik untuk suatu aplikasi.

Endapan garam alami dapat mengandung kubus hopper berukuran sentimeter, kadang-kadang tersuspensi dalam lumpur yang jenuh larutan garam. Makalah 2019 mengusulkan kemungkinan analogi dengan pertumbuhan lambat yang didominasi difusi. Ini adalah perbandingan yang menarik, bukan bukti bahwa hopper alami dan hopper orbital memiliki mekanisme yang sama.

Singkatnya

Kristal garam yang tumbuh dari larutan garam yang menguap di Stasiun Luar Angkasa Internasional mencakup kubus hopper berongga dan bertingkat dengan ukuran 2 hingga 8 milimeter. Makalah-makalah tersebut mendukung penjelasan berbasis transport: mikrogravitasi sangat menekan pengendapan biasa dan aliran yang digerakkan gaya apung, sehingga memungkinkan pertumbuhan lambat dan suspensi lebih lama sementara difusi mendominasi tahap awal. Geometri cairan, antarmuka, penguapan, dan bahan tambahan juga memengaruhi morfologi. Difraksi neutron tidak menunjukkan struktur natrium klorida baru, dan inklusi larutan garam tetap ada. Pekerjaan ini adalah studi kasus ilmu material yang terbatas cakupannya, bukan bukti bahwa ruang angkasa menghasilkan kristal sempurna atau memungkinkan suatu proses industri.

Penilaian tanpa berlebihan

Apa yang ditunjukkan makalah-makalah tersebut: Kubus hopper natrium klorida berskala milimeter dan morfologi lain tumbuh dalam beberapa geometri larutan garam di ISS. Kubus hopper dalam studi 2019 tumbuh perlahan pada estimasi lewat jenuh rendah, dengan difusi mendominasi tahap awal.

Apa yang ditafsirkan: Penurunan besar pada pengendapan dan aliran yang digerakkan gaya apung memungkinkan suspensi lebih lama dan pertumbuhan yang lebih simetris. Gerakan cairan yang lambat mungkin berpengaruh pada tahap akhir di kristalisator yang lebih besar.

Apa yang tidak ditunjukkan: Bentuk atomik garam baru, kristal yang lebih murni atau bebas cacat, uji Bumi-versus-ISS dengan kondisi yang dicocokkan, keuntungan universal mikrogravitasi, atau jalur manufaktur komersial.

Keterbatasan utama: Tiga studi berbeda dengan geometri dan contoh terpilih yang berbeda; perbandingan terestrial lintas studi; besaran transport yang diestimasi; bagian dossier yang eksploratif dan tidak terprogram; serta tidak adanya ekonomi proses atau uji kinerja.

Seberapa besar keyakinan yang layak dimiliki pembaca umum? Keyakinan tinggi bahwa morfologi

orbital dan pertumbuhan lambat yang dilaporkan benar-benar nyata. Keyakinan sedang bahwa penjelasan berbasis transport adalah penjelasan terbaik untuk keseluruhan pengamatan. Keyakinan sangat rendah terhadap klaim apa pun yang mengubah eksperimen garam ini menjadi janji umum tentang manufaktur di ruang angkasa.

Sumber

Pettit and Fontana, Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions, npj Microgravity 5, 25 (2019)
https://doi.org/10.1038/s41526-019-0085-0

Fontana, Schefer and Pettit, Characterization of sodium chloride crystals grown in microgravity, Journal of Crystal Growth 324, 207-211 (2011)
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.04.001

Fontana, Pettit and Cristoforetti, Sodium chloride crystallization from thin liquid sheets, thick layers, and sessile drops in microgravity, Journal of Crystal Growth 428, 80-85 (2015)
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.07.026