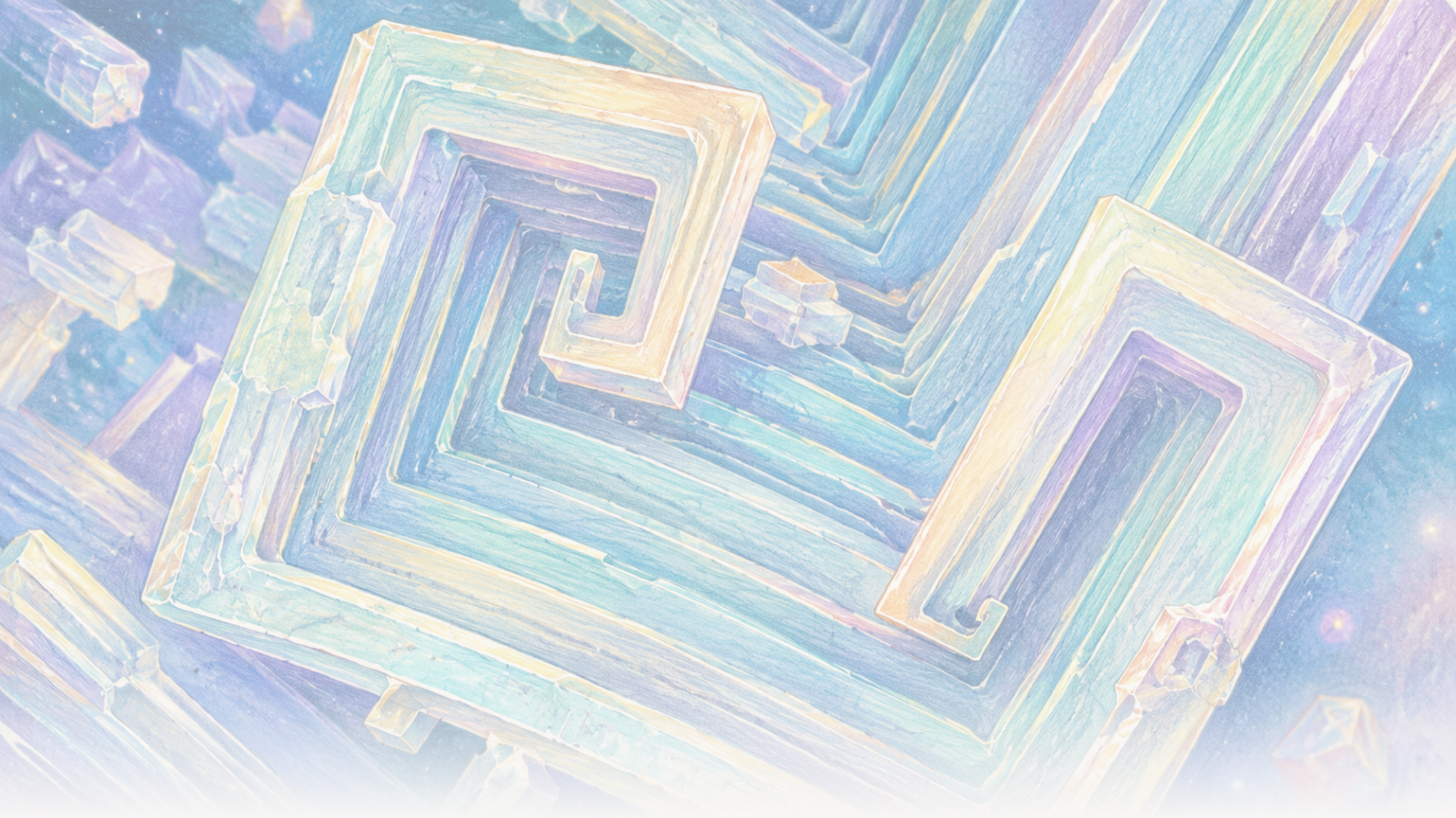


The Clean Paper

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

Di orbit, garam meja membentuk kiub berongga. Graviti mengubah larutan garam, bukan garam itu sendiri

Kristal natrium klorida yang ditumbuhkan di Stesen Angkasa Antarabangsa merangkumi kiub berongga bertingkat bersaiz 2 hingga 8 milimeter. Kertas-kertas kajian menyokong penjelasan berasaskan pengangkutan: pemendapan biasa dan aliran akibat daya apung sangat ditekan, manakala resapan mendominasi pertumbuhan awal. Kekisi kristalnya tidak berubah menjadi fasa natrium klorida baharu, dan eksperimen ini tidak menetapkan 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 kiub berongga bertingkat

Kristalnya kelihatan seperti karya seni bina: bingkai persegi bersarang di dalam bingkai persegi lain, dengan permukaan yang cekung membentuk tangga.

Kristal itu diperbuat daripada natrium klorida biasa, sebatian yang sama dengan garam meja. Hal yang tidak biasa bukanlah bahannya. Yang berbeza adalah larutan garam di sekelilingnya.

Di Bumi, kristal yang sedang tumbuh di dalam isipadu cecair berskala sentimeter dapat tenggelam, menyentuh dinding atau permukaan, dan turut mewujudkan perbezaan ketumpatan yang mengedarkan larutan. Di Stesen Angkasa Antarabangsa, pemendapan biasa dan aliran yang digerakkan oleh daya apung sangat ditekan. Beberapa kristal garam tetap tersuspensi cukup lama untuk tumbuh perlahan-lahan dan lebih simetri menjadi **kiub hopper** dengan panjang rusuk antara 2 dan 8 milimeter.

Tiga kajian, yang diterbitkan pada 2011, 2015, dan 2019, menggambarkan eksperimen-eksperimen ini. Bersama-sama, ketiga-tiganya memberi pelajaran yang jernih tentang fizik pengangkutan: mengubah cara bahan terlarut mencapai sebuah kristal dapat mengubah bentuk yang kelihatan tanpa mengubah struktur atomiknya.

Eksperimen ini tidak menunjukkan bahawa angkasa lepas menghasilkan kristal sempurna, tidak menetapkan suatu proses industri, dan tidak mendedahkan jenis garam baru.

Apa yang menjadikan sebuah kiub berbentuk hopper

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

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

[figure_pair pending]

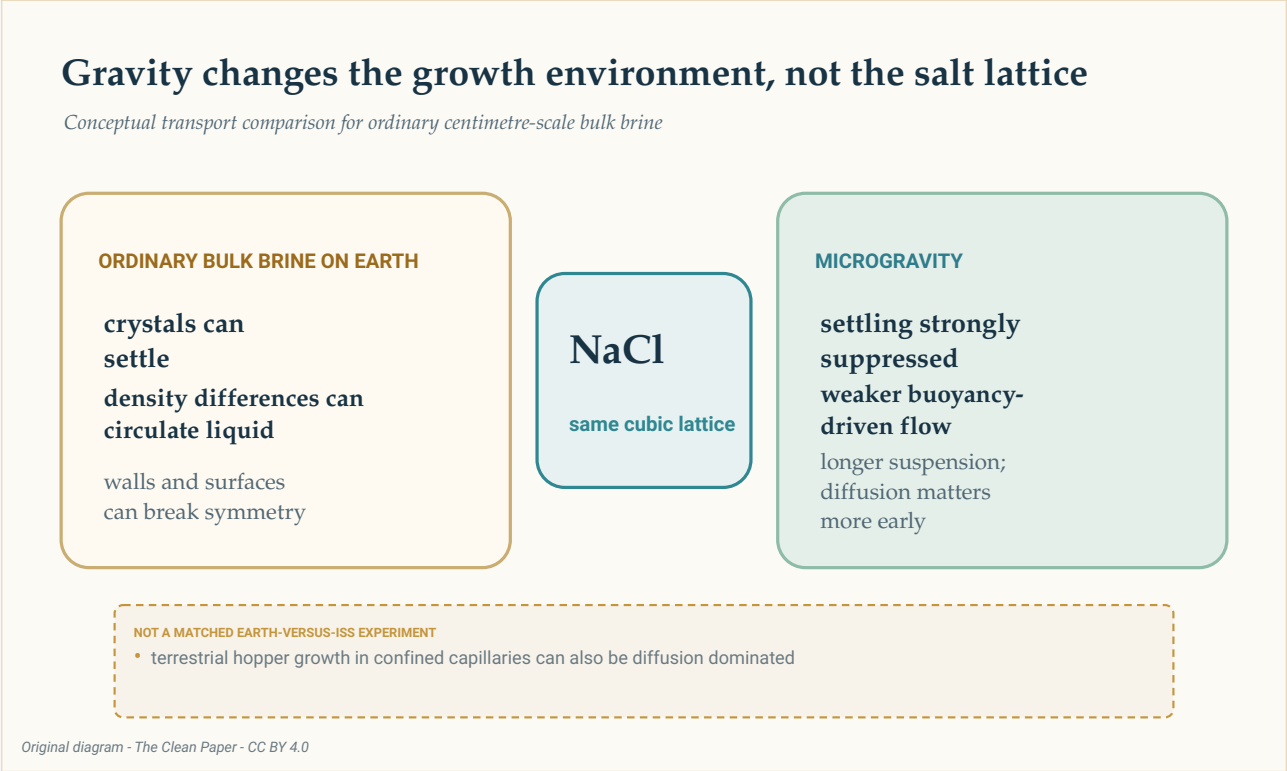
Dua mikrograf elektron imbasan kristal hopper kalium klorida berbentuk gulungan yang ditumbuhkan di ISS. Imej yang lebih baru ini merupakan contoh kontekstual morfologi, bukan sampel natrium klorida atau pengukuran dari kajian 2011, 2015, atau 2019 yang dibahas dalam artikel ini.

[video pending]

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

Kristal tumbuh dari **larutan garam ketepuan lampau**: air garam yang mengandungi natrium klorida terlarut lebih banyak daripada yang dapat dipertahankan pada keseimbangan dalam keadaan tersebut. Ion natrium dan klorida perlu bergerak melalui cecair dan bergabung dengan permukaan kristal.

Secara umum ada dua cara untuk memindahkannya. **Resapan** adalah gerak molekul rawak yang membawa bahan terlarut mengikuti perbezaan kepekatan tanpa peredaran cecair secara pukal. **Konveksi** adalah pergerakan cecair itu sendiri. Dalam graviti biasa, perbezaan kecil suhu atau kepekatan boleh mengubah ketumpatan dan mendorong peredaran akibat daya apung. Kristal juga dapat **mengendap**, atau turun melalui cecair.



Perbandingan konseptual menunjukkan kekisi natrium klorida yang sama di kedua persekitaran. Larutan garam pukal biasa di Bumi dapat melibatkan pemendapan, peredaran akibat daya apung, dan sentuhan dengan permukaan; mikrograviti sangat menekan dua proses pertama, membolehkan suspensi lebih lama dan membuat resapan lebih penting pada tahap awal pertumbuhan. Ini bukan eksperimen Bumi-versus-ISS dengan keadaan yang dipadankan.

The Clean Paper CC BY 4.0

Eksperimen ini dilakukan di Stesen Angkasa Antarabangsa, makmal mikrograviti yang mengorbit. Istilah **mikrograviti** bukan bermakna tanpa graviti. Makalah 2019 melaporkan percepatan sisa sekitar 1,2 juta bahagian dari graviti permukaan Bumi, atau 1,2 mikro-g, disertai pergerakan cecair siklik yang lambat. Persekitaran itu mengubah keseimbangan pengangkutan; ia tidak membuat larutan garam benar-benar diam.

Laluan perlahan menuju kiub berskala milimeter

Kajian 2019 berfokus pada kiub hopper yang tumbuh ketika air menguap daripada larutan garam di ISS. Panjang rusuk kiub yang dilaporkan berkisar antara **2 hingga 8 milimeter**. Kadar pertumbuhan berkisar antara **0,34 hingga 1,0 mikrometer per minit** (sekitar **0,49 hingga 1,44 milimeter per hari**), dengan purata **0,68 mikrometer per minit** dan sisihan piawai 0,23.

Pada kadar purata tersebut, rusuk sepanjang 8 milimeter akan memerlukan kira-kira satu minggu untuk berkembang. Pengiraan ini adalah anggaran, bukan pengukuran time-lapse untuk setiap tahap daripada satu kristal tertentu.

Para penulis menganggarkan tahap ketepuan lampau di bawah **1,002**. Literatur pembanding di Bumi yang mereka gunakan menggambarkan pertumbuhan hopper pada ketepuan lampau jauh lebih tinggi, di atas 1,45, dengan kadar 10 hingga 110 mikrometer per detik selama kiraan detik atau minit, biasanya menghasilkan kiub lebih kecil daripada 250 mikrometer.

Perbandingan tersebut informatif, tetapi tidak dipadankan secara langsung. Kristal ISS dan literatur eksperimen di Bumi tidak berasal daripada lengan eksperimen Bumi dan orbit yang dijalankan secara serentak dan sama oleh pasukan yang sama. Perbezaan bekas, antara muka, dan kaedah dapat mempengaruhi di samping graviti.

Oleh itu, perbezaan yang paling jelas bersifat deskriptif: dalam pemerhatian ISS ini, kiub hopper tumbuh perlahan-lahan, pada ketepuan lampau yang rendah, selama berhari-hari hingga berminggu-minggu, dan mencapai skala milimeter.

Resapan mendominasi pada awalnya; aliran masih mungkin berlaku kemudian

Makalah 2019 menggunakan **bilangan Peclet** untuk membandingkan pengangkutan akibat pergerakan cecair dengan pengangkutan akibat resapan. Nilai di bawah satu bermakna resapan lebih penting; nilai di atas satu bermakna pergerakan jisiml cecair mungkin mendominasi.

> **Sebuah nisbah, bukan sakelar**
>
> Bilangan Peclet adalah perbandingan antara dua kadar pengangkutan. Ia tidak membahagikan dunia menjadi cecair yang benar-benar diam di bawah satu dan konveksi tulen di atas satu. Di sini nilainya berubah mengikut saiz kristal dan anggaran kelajuan larutan garam di sekelilingnya. Kristal terkecil jelas terletak dalam rejim yang didominasi resapan; kristal terbesar di bekas yang lebih besar dapat memasuki rejim di mana pergerakan cecair yang lambat turut mempengaruhi.

Dalam titisan yang lebih kecil, berukuran kira-kira 0,8 sentimeter, anggaran bilangan Peclet meningkat dari sekitar **0,0004** dekat tahap nukleasi menjadi sekitar **0,03** pada saiz akhir yang

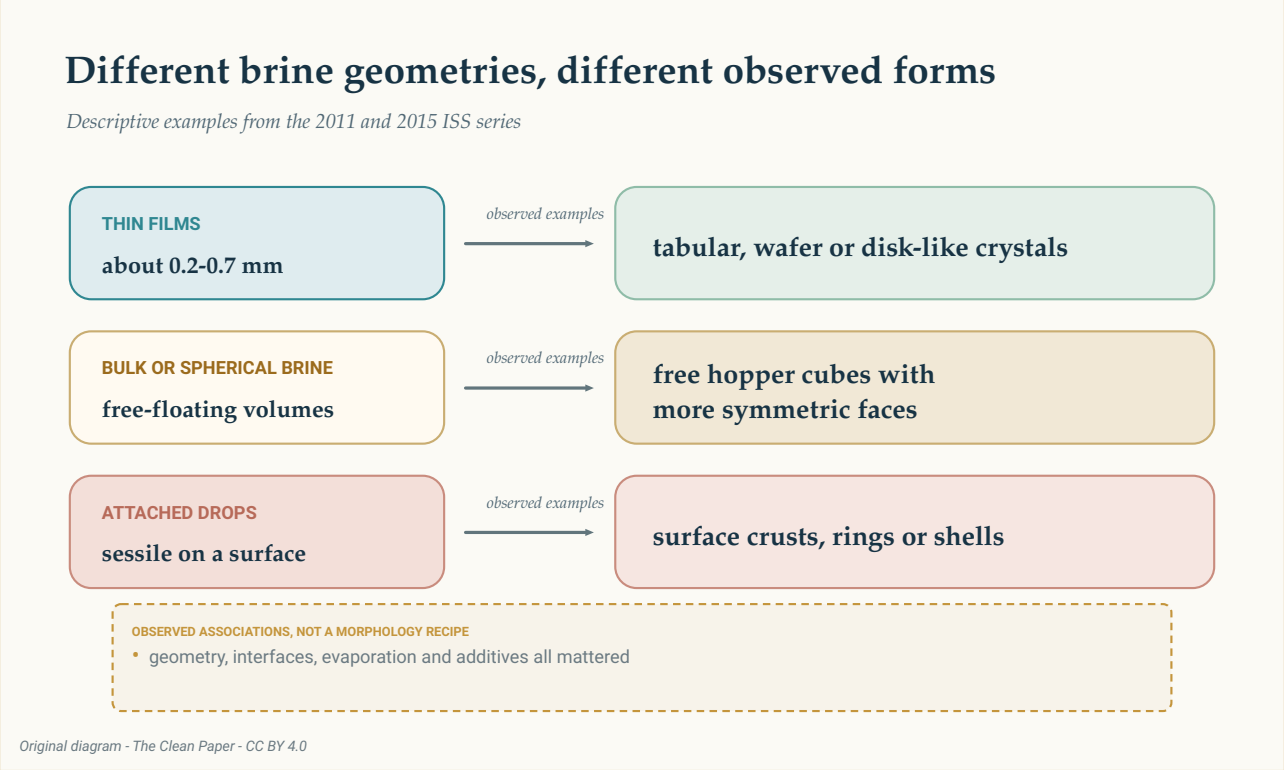
diukur. Resapan tetap dominan.

Dalam kristalisator berukuran 2 hingga 3 sentimeter, anggaran meningkat dari sekitar **0,05** untuk inti 50 mikrometer menjadi sekitar **4** untuk rusuk 4 milimeter. Pertumbuhan awal masih didominasi resapan, tetapi pergerakan siklik yang lambat mungkin ikut menyumbang pada tahap seterusnya.

Inilah sebabnya pernyataan “mikrograviti menyingkirkan konveksi” akan keliru. Peredaran biasa akibat daya apung dan pemendapan sangat dikurangi. Percepatan sisa dan pergerakan yang dapat diukur tetap ada.

Bentuk cecair juga mempengaruhi

Makalah 2011 dan kajian 2015 memperluas gambaran tersebut. Kedua-duanya melaporkan penghabluran garam dalam lapisan nipis, lapisan cecair yang lebih tebal, isipadu larutan garam yang kurang lebih bulat, dan titisan yang melekat pada suatu permukaan.



Tiga baris merangkum contoh yang diperhatikan dalam keseluruhan set kajian: lapisan nipis dengan bentuk tabular atau menyerupai cakera, larutan garam pukal atau berbentuk bulat dengan kiub hopper bebas, serta titisan yang melekat dengan kerak, cincin, atau cangkerang. Hubungan ini bersifat deskriptif, bukan resep atau jaminan.

The Clean Paper CC BY 4.0

Dalam kajian 2011, lapisan nipis setebal kira-kira 0,2 hingga 0,7 milimeter menghasilkan kepingan nipis dan kristal tabular. Isipadu larutan garam yang mengambang bebas membolehkan bahagian

lateral yang lebih simetri dan kiub hopper.

Pemerhatian 2015 merangkumi helaian nipis setebal 0,2 hingga 0,7 milimeter, lapisan lebih tebal sekitar 4 hingga 6 milimeter, dan titisan hemisferis yang melekat dengan lebar kira-kira 20 hingga 32 milimeter. Bentuk yang dilaporkan merangkumi hopper tabular, kiub, kristal menyerupai cakera, dendrit, cincin, dan cangkerang. Penambahan polietilena glikol menekan pertumbuhan hopper dalam salah satu rangkaian pemerhatian.

Para penulis menggambarkan kajian 2015 sebagai pemerhatian yang dilakukan menggunakan persediaan yang tidak didaftarkan secara khusus semasa masa lapang kru, bukan penyelidikan terancang yang ketat. Contoh-contoh ini menunjukkan bahawa geometri cecair, antara muka, penguapan, dan bahan tambahan kesemuanya mempengaruhi. Mereka tidak menetapkan peraturan deterministik di mana satu bentuk bekas menjamin satu bentuk kristal.

Kekisi kristal tidak berubah menjadi fasa garam baharu

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

Struktur adalah susunan atom berulang. Morfologi adalah bentuk luar yang kelihatan. Dipecahan neutron dalam kajian 2011 tidak mendapati struktur natrium klorida yang berubah atau perubahan parameter sel kekisi berbanding dengan sampel daratan. Sampel orbital juga mengandungi **inklusi larutan garam**, iaitu kantong-kantong kecil larutan yang terperangkap di dalam kristal.

Jadi, rupa yang besar dan simetri bukanlah bukti bahan yang lebih tulen atau bebas kecacatan. Tidak satu pun kajian dalam set kajian ini melaporkan ketulenan kimia yang lebih tinggi, prestasi mekanikal yang lebih baik, atau kesesuaian untuk peranti tertentu.

Graviti berfungsi secara tidak langsung. Ia mengubah pemendapan, peredaran cecair, orientasi, dan sentuhan dengan permukaan. Ia tidak mengubah kekuatan ikatan natrium-klorida atau mewujudkan fasa atom baru.

Apa yang boleh dan tidak boleh diajar oleh eksperimen ini

Kajian-kajian tersebut menyokong penjelasan berasaskan pengangkutan: penekanan kuat terhadap pemendapan biasa dan aliran yang digerakkan daya apung membolehkan beberapa kristal tetap tersuspensi dan tumbuh perlahan-lahan dalam keadaan yang lebih simetri. Saiz, kadar, dan bentuk yang diukur merupakan pemerhatian langsung; tahap ketepuan lampau, sejarah pertumbuhan, dan bilangan Peclet merangkumi anggaran; perbandingan dengan Bumi sebahagian berasal daripada eksperimen lain yang telah diterbitkan.

Tiada satu penyebut tunggal yang rapi untuk keseluruhan set kajian. Set kajian ini menggabungkan kristal individu, kristalisator, dan contoh terpilih dari tiga kajian. Menjumlahkannya menjadi satu keseluruhan akan memberi kesan kehadiran satu eksperimen seragam yang sebenarnya tidak per-

nah ada.

Kajian-kajian ini juga tidak melaporkan bukti yang diperlukan untuk dakwaan pembuatan. Tiada pengukuran kadar pemprosesan, kos pengeluaran, penggunaan tenaga, hasil, kebolehpercayaan, atau prestasi bahan yang berguna. Rangkaian 2015 bersifat eksploratif. Perbandingan dengan eksperimen di Bumi bukan kawalan yang dipadankan. Dan besar atau menarik secara visual tidak sama dengan lebih baik untuk suatu kegunaan.

Endapan garam semula jadi dapat mengandungi kiub hopper berukuran sentimeter, kadang-kadang tersuspensi dalam lumpur yang tepu larutan garam. Makalah 2019 mencadangkan kemungkinan analogi dengan pertumbuhan lambat yang didominasi resapan. Ini adalah perbandingan yang menarik, bukan bukti bahawa hopper semula jadi dan hopper orbital mempunyai mekanisme yang sama.

Ringkasan utama

Kristal garam yang tumbuh daripada larutan garam yang menguap di Stesen Angkasa Antarabangsa merangkumi kiub hopper berongga dan bertingkat dengan saiz 2 hingga 8 milimeter. Kajian-kajian tersebut menyokong penjelasan berasaskan pengangkutan: mikrograviti sangat menekan pemendapan biasa dan aliran yang digerakkan daya apung, sehingga membolehkan pertumbuhan lambat dan suspensi lebih lama sementara resapan mendominasi tahap awal. Geometri cecair, antara muka, penguapan, dan bahan tambahan juga mempengaruhi morfologi. Dipecahan neutron tidak menunjukkan struktur natrium klorida baru, dan inklusi larutan garam tetap ada. Kajian ini adalah kajian kes sains bahan yang terhad cakupannya, bukan bukti bahawa angkasa lepas menghasilkan kristal sempurna atau membolehkan suatu proses industri.

Semakan tanpa sensasi

Apa yang ditunjukkan kertas-kajian tersebut: Kiub hopper natrium klorida berskala milimeter dan morfologi lain tumbuh dalam beberapa geometri larutan garam di ISS. Kiub hopper dalam kajian 2019 tumbuh perlahan-lahan pada anggaran ketepuan lampau rendah, dengan resapan mendominasi tahap awal.

Apa yang ditafsirkan: Penurunan besar pada pemendapan dan aliran yang digerakkan daya apung membolehkan suspensi lebih lama dan pertumbuhan yang lebih simetri. Pergerakan cecair yang lambat mungkin mempengaruhi pada tahap akhir di kristalisator yang lebih besar.

Apa yang tidak ditunjukkan: Bentuk atom garam baru, kristal yang lebih tulen atau bebas kecacatan, ujian Bumi-versus-ISS dengan keadaan yang dipadankan, keuntungan universal mikrograviti, atau laluan pembuatan komersial.

Had utama: Tiga kajian berbeza dengan geometri dan contoh terpilih yang berbeza; perbandingan daratan lintas kajian; kuantiti pengangkutan yang dianggarkan; bahagian kajian yang bersifat pen-

erokaan dan tidak terancang; serta ketiadaan analisis ekonomi proses atau ujian prestasi.

Sejauh mana keyakinan yang wajar bagi pembaca umum? Keyakinan tinggi bahawa morfologi di orbit dan pertumbuhan lambat yang dilaporkan benar-benar berlaku. Keyakinan sedang bahawa penjelasan berasaskan pengangkutan adalah penjelasan terbaik untuk keseluruhan pemerhatian. Keyakinan sangat rendah terhadap dakwaan apa-apa yang mengubah eksperimen garam ini menjadi janji umum tentang pembuatan di angkasa lepas.

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