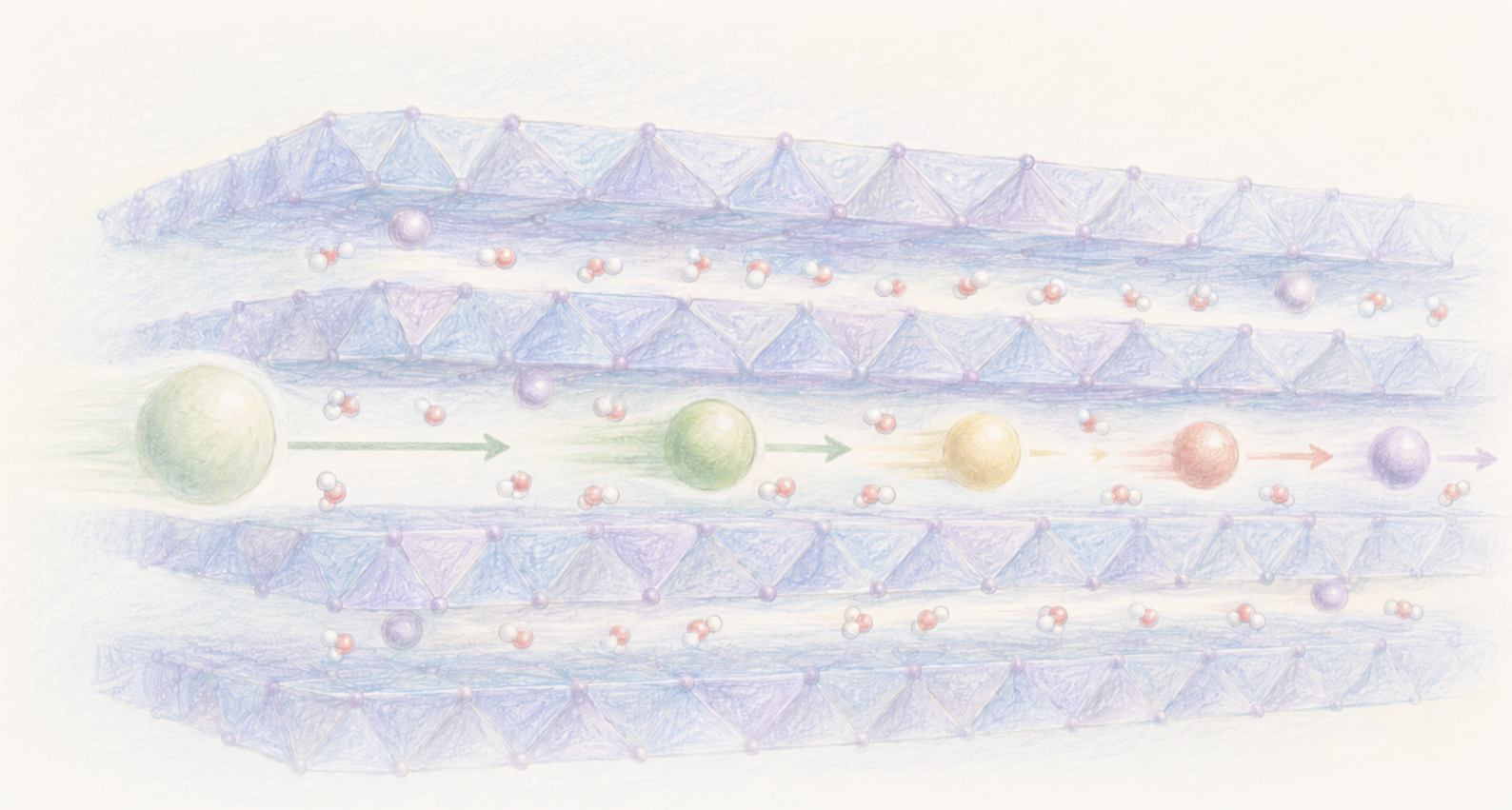


The Clean Paper

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

Menahan kanal mineral berisi air membantu memisahkan ion tanah jarang yang mirip

Magnesium mempertahankan celah oksida mangan terhidrasi mendekati lebar selubung air ion lantanida dan meningkatkan pengayaan pasangan tertentu dalam uji laboratorium. Pekerjaan yang didemonstrasikan menggunakan mililiter larutan dan miligram bahan; operasi aliran, umur siklus panjang, dan kinerja lingkungan komersial belum terbukti.

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

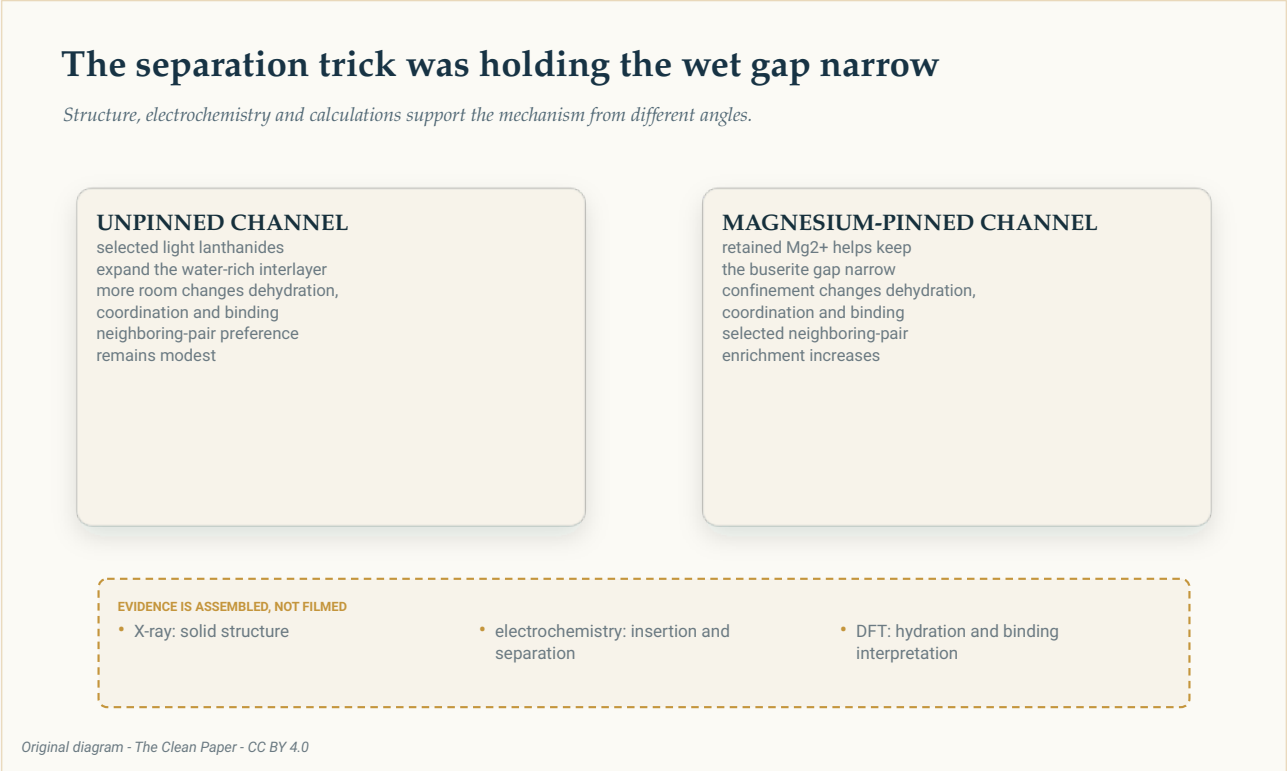
Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

Menahan kanal mineral berisi air membantu memisahkan ion tanah jarang yang mirip

Ion tanah jarang sulit dipisahkan karena alasan yang sama mengapa saudara kandung bisa sulit dibedakan dari kejauhan: perbedaannya nyata, tetapi kecil.

Lantanida terletak bersebelahan dalam tabel periodik dan biasanya membentuk ion dengan muatan yang sama. Ukurannya berubah secara bertahap sepanjang deret, sementara perilaku kimianya tetap mirip. Karena itu, pemurnian industri mengandalkan banyak tahap pemisahan yang berulang.

Sebuah studi laboratorium baru mendekati masalah itu melalui pembatasan ruang. Para peneliti menggunakan lembaran oksida mangan bertumpuk dengan celah berisi air di antaranya. Ion tanah jarang mendekati celah ini sambil diselubungi molekul air. Tanpa penahan, lembaran dapat bergerak menjauh untuk memberi ruang. Ion magnesium bertindak seperti penahan: ketika tetap berada di antara lembaran, magnesium membantu menjaga celah tetap sempit. Ion tanah jarang yang berbeda kemudian harus membayar biaya energi yang berbeda untuk melepaskan sebagian air, memasuki kanal, dan berikatan dengan atom oksigen di padatan.



Kanal tanpa penahan dan kanal yang ditahan magnesium adalah interpretasi mekanistik yang didukung oleh struktur, elektrokimia, dan perhitungan. Tidak ada satu eksperimen pun yang mengamati seluruh urutan molekuler secara langsung.

The Clean Paper CC BY 4.0

Untuk salah satu pasangan yang diuji, lantanum dan neodimium, **penahanan** ini meningkatkan faktor pengayaan dari 1.6 menjadi **5.4**. Untuk lantanum dan praseodimium, nilainya meningkat dari

1.5 menjadi **4.2**. Faktor pengayaan membandingkan rasio dua ion setelah pemisahan dengan rasio keduanya sebelum pemisahan. Nilai 1 berarti tidak ada preferensi; 5.4 berarti bahan yang tertangkap lebih mengutamakan neodimium dibanding lantanum sebesar 5.4 kali daripada campuran awal.

Itu adalah hasil laboratorium yang bermakna untuk pasangan tertentu. Hasil tersebut bukan bukti bahwa setiap unsur tanah jarang kini dapat dipisahkan dengan bersih, bahwa proses aliran kontinu telah didemonstrasikan, atau bahwa ekstraksi pelarut dapat digantikan.

Gagasan terkuat dalam makalah ini jauh lebih kecil daripada sebuah kilang: mencegah celah mineral basah agar tidak membuka lebih lebar.

Ion di dalam air lebih besar daripada atom telanjang

Unsur tanah jarang mencakup lantanida ditambah skandium dan itrium. Studi ini menguji dua belas ion lantanida bermuatan positif dari lantanum hingga iterbium. Serium tidak disertakan karena mudah berubah tingkat oksidasi, dan prometium radioaktif juga dikecualikan.

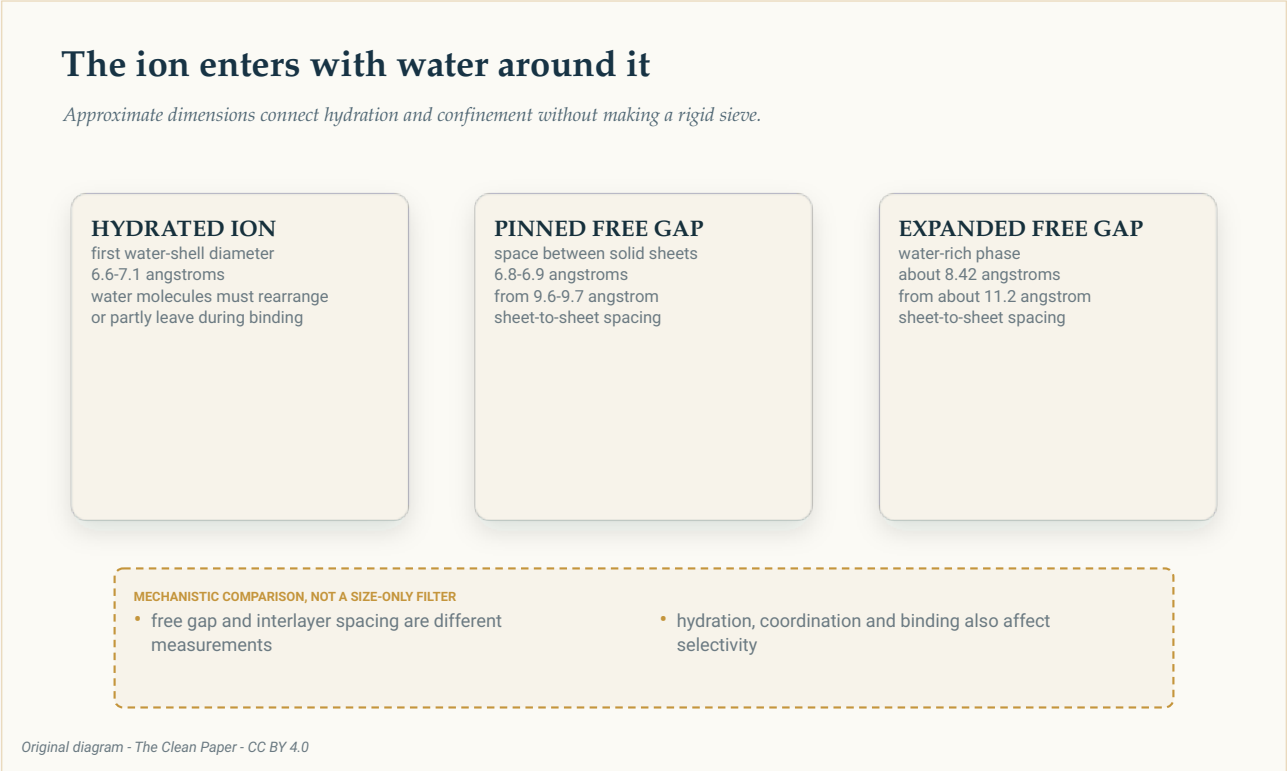
Di dalam air, ion tidak bergerak sendirian. Molekul air tersusun mengelilingi muatannya dan membentuk **selubung hidrasi**. Untuk memasuki kanal sempit dan berikatan dengan padatan, ion mungkin perlu menata ulang atau melepaskan sebagian lapisan air tersebut. Biaya energinya bergantung pada ion maupun lingkungannya.

Dimensi diukur dalam **angstrom (Å)**. Satu angstrom adalah sepersepuluh miliar meter (**1 Å =** 10^{-10} **m**). Diameter selubung hidrasi pertama lantanida yang diuji dilaporkan sekitar **6.6 hingga 7.1 Å**.

Para peneliti menggunakan oksida mangan berlapis terhidrasi yang disebut buserit. Jarak antara lembaran bertumpuknya sekitar **9.6 hingga 9.7 angstrom**, diukur dari satu posisi lembaran yang berulang ke posisi berikutnya. Namun, lembaran itu sendiri memakan ruang. Celah bebas berisi air yang tersedia di antara lembaran hanya sekitar **6.8 hingga 6.9 angstrom**.

Perbedaan itu penting. Jarak antarlapis 9.7 angstrom bukan berarti kanal terbuka selebar 9.7 angstrom.

Beberapa lantanida yang lebih ringan membuat struktur mengembang menjadi fase yang lebih kaya air. Di sana, jarak antarlembarnya sekitar **11.2 angstrom** dan celah bebas yang diperkirakan sekitar **8.42 angstrom**. Struktur terkait yang lebih sempit, birnesit, memiliki celah bebas sekitar **4.42 angstrom**.



Perbandingan ini adalah antara perkiraan diameter selubung hidrasi dan celah bebas berisi air, bukan antara ion telanjang dan jarak penuh antarlembarnya. Ukuran merupakan bagian dari mekanisme, tetapi bukan seluruh penjelasannya.

The Clean Paper CC BY 4.0

Mineral dapat menyesuaikan diri dengan ion

Tanpa penahanan oleh magnesium, kanal bukanlah saringan yang kaku: lembaran bertumpuknya dapat bergerak. Dalam eksperimen, ion yang lebih ringan—lantanum, praseodimium, dan neodimium—membuat bahan menyerap lebih banyak air dan membuka lebih lebar. Ion yang lebih berat dari europium hingga iterbium cenderung membiarkan kanal yang lebih sempit tetap utuh. Samarium berada di antara dua respons tersebut.

Makalah menyebut respons pertama **Kelompok I** dan respons kedua **Kelompok II**. Ini adalah label untuk cara ion membuat bahan khusus ini merespons, bukan nomor golongan dalam tabel periodik. Batasnya juga dapat berubah pada kondisi eksperimen lain.

Perbedaan struktur itu membantu untuk pasangan lintas kelompok. Dalam pertukaran ion langsung, faktor pengayaan yang dilaporkan adalah **7.8** untuk lantanum dibanding disprosium, **5.7** untuk praseodimium dibanding disprosium, **4.5** untuk neodimium dibanding disprosium, dan **2.6** untuk neodimium dibanding europium.

Sebagian besar pasangan yang berdekatan jauh lebih sulit, dengan faktor pengayaan sekitar 1.1. Faktor mendekati 1 berarti hanya sedikit preferensi. Bahan lebih mudah membedakan dua ion ketika

keduanya menyukai struktur kanal yang berbeda daripada ketika keduanya berdekatan dalam kelompok respons yang sama.

Magnesium menahan kanal

Para peneliti kemudian menggunakan **interkalasi elektrokimia**: reaksi listrik yang menyisipkan ion di antara lapisan padat. Ion magnesium tetap berada di kanal ketika ion tanah jarang masuk. Magnesium yang tertahan membantu mencegah jarak buserit mengembang.

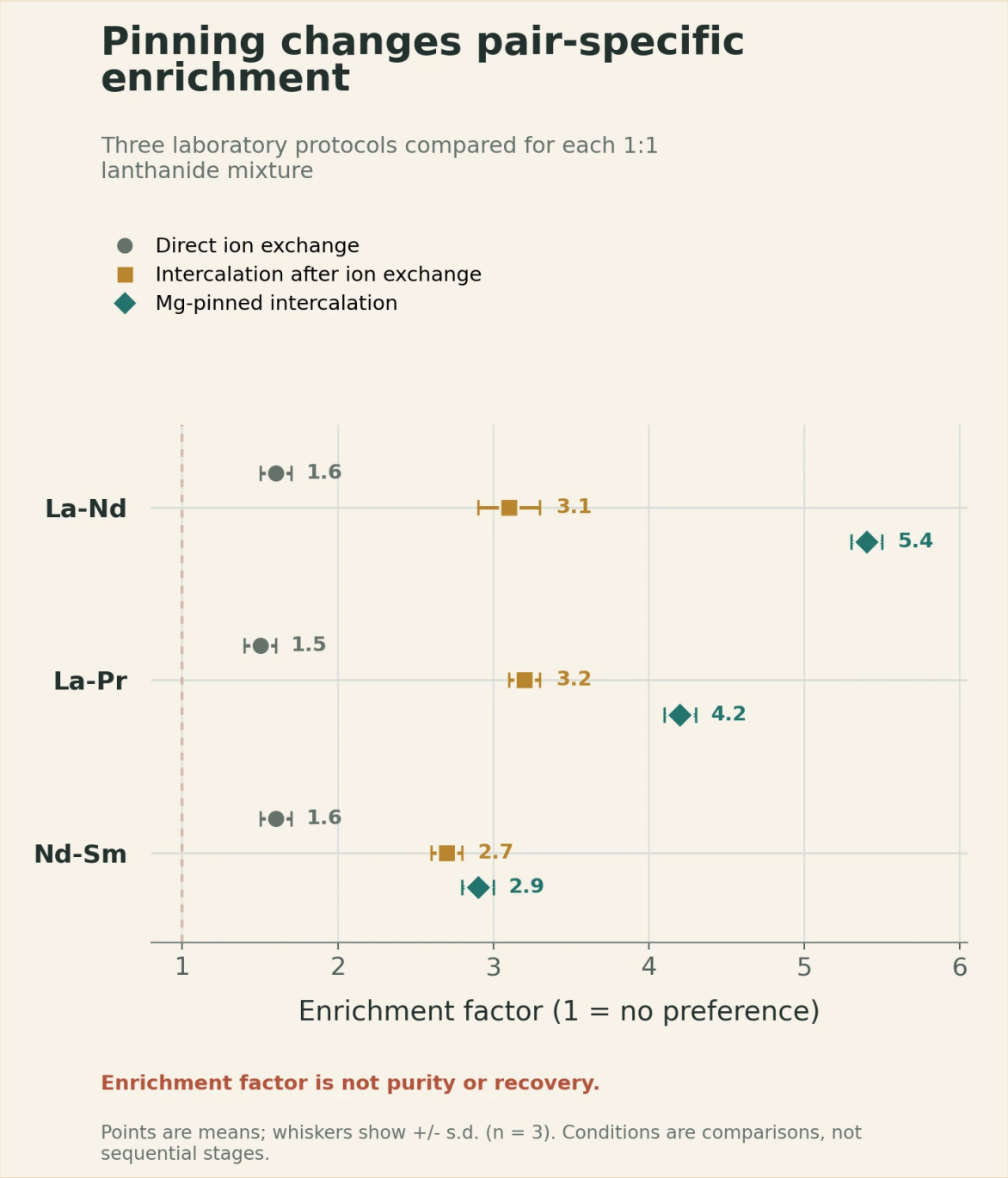
Di dalam celah basah yang lebih sempit itu, ion terhidrasi yang masuk memiliki ruang lebih sedikit. Mekanisme yang diajukan menggabungkan pembatasan ruang, dehidrasi parsial, koordinasi, dan pengikatan. **Koordinasi** berarti atom-atom terdekat, sering kali oksigen, yang secara langsung mengelilingi dan berinteraksi dengan ion.

Buktinya berasal dari beberapa jenis pekerjaan. Pengukuran sinar-X melacak struktur padatan. Eksperimen elektrokimia mengukur penyisipan dan pemisahan. **Teori fungsional kerapatan**, sebuah perhitungan mekanika kuantum, membandingkan struktur, hidrasi, dan pengikatan. Perhitungan membantu menafsirkan mekanisme; itu bukan rekaman langsung satu ion yang bergerak melalui kanal.

Mekanismenya juga bukan sekadar “ion kecil lewat, ion besar berhenti”. Selubung air, cara lapisan merespons, besarnya biaya dehidrasi, dan cara ion berkoordinasi dengan padatan semuanya ikut berperan.

Penahanan memperbaiki beberapa pasangan yang berdekatan

Perubahan terbesar yang disorot adalah untuk lantanum dan neodimium: pengayaan meningkat dari **1.6 +/- 0.1** tanpa penahanan menjadi **5.4 +/- 0.1** dengan penahanan magnesium. Lantanum dibanding praseodimium meningkat dari **1.5 +/- 0.1** menjadi **4.2 +/- 0.1**. Neodimium dibanding samarium meningkat dari **1.6 +/- 0.1** menjadi **2.9 +/- 0.1**.



Setiap baris membandingkan tiga protokol laboratorium terpisah, bukan tahapan berurutan dari satu proses. Faktor 1 berarti tidak ada preferensi; nilai yang lebih tinggi menunjukkan pengayaan spesifik-pasangan yang lebih kuat. Titik menunjukkan rata-rata dan garis rentang menunjukkan +/- simpangan baku (n = 3).

The Clean Paper CC BY 4.0

Pada pH 2, nilai lantanum-neodimium adalah **5.6 +/- 0.2**. Menaikkan laju listrik lima kali lipat, dari 0.1C menjadi 0.5C, menurunkannya dari **5.4 +/- 0.1** menjadi **4.3 +/- 0.4**. C-rate membandingkan arus listrik yang diterapkan dengan kapasitas bahan. Laju yang lebih tinggi memberi ion dan padatan lebih sedikit waktu untuk merespons.

Tidak ada satu nilai pun yang menggambarkan bahan ini secara universal. Pengayaan bergantung pada pasangan ion, struktur padatan, keasaman, dan laju operasi.

Makalah juga menguji bahan terhadap ion non-tanah-jarang yang sangat melimpah. Campuran awal mengandung satu ion tanah jarang untuk setiap 1,000 ion pesaing. Nilai selektivitas yang dilaporkan sekitar **1,200** terhadap natrium, **6,500** terhadap kalsium, dan **1,700** terhadap magnesium.

Itu merupakan bukti berguna bahwa ion umum tidak otomatis mengalahkan proses pemisahan pada kondisi laboratorium ini. Namun, ini bukan pengujian cairan lengkap yang berasal dari bijih dengan seluruh logam, keasaman, dan kontaminannya.

Pengayaan, faktor pemisahan, kemurnian, pengurangan, dan pemulihan adalah hasil yang berbeda

Beberapa ukuran kinerja muncul dalam makalah, dan ukuran-ukuran itu tidak dapat saling menggantikan.

Faktor pengayaan membandingkan rasio dua ion setelah pemisahan dengan rasio keduanya sebelum pemisahan. Nilai 5.4 berarti bahan yang tertangkap lebih mengutamakan salah satu anggota pasangan itu sebesar 5.4 kali dibanding campuran awal.

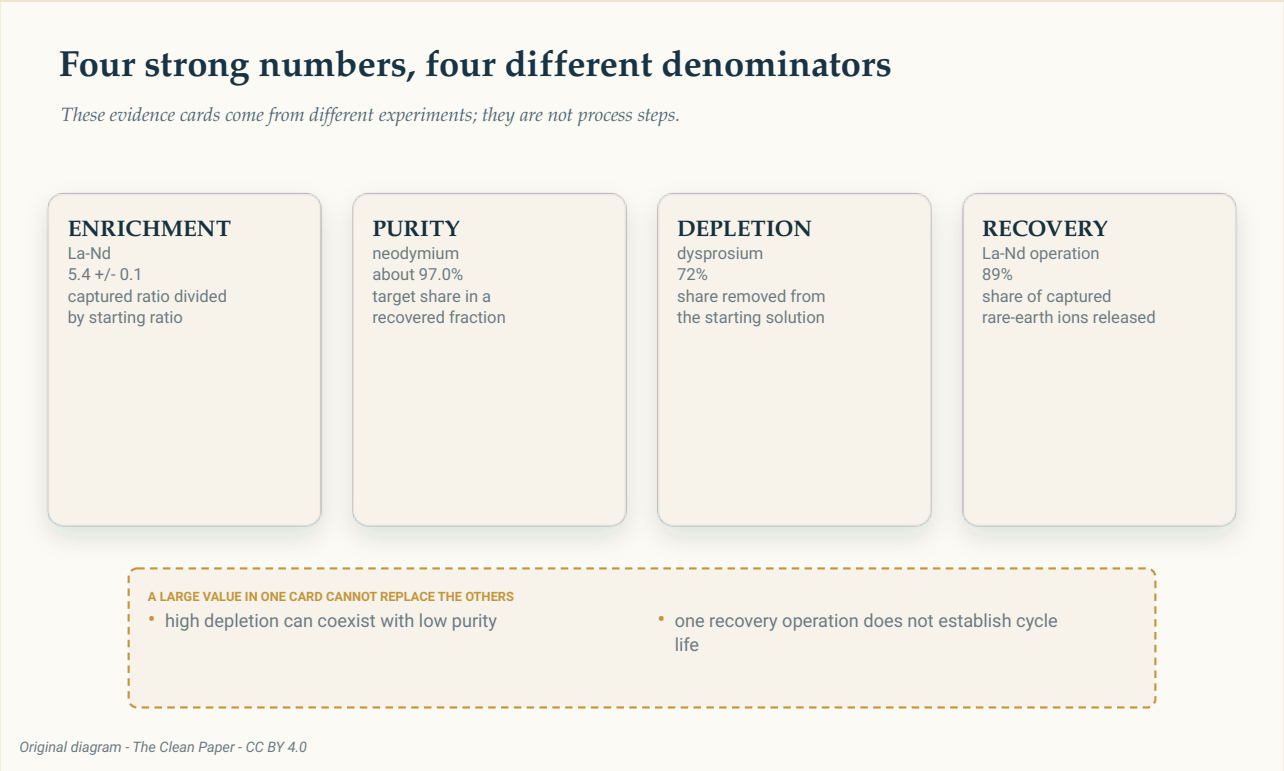
Faktor pemisahan juga memperhitungkan apa yang tersisa di dalam cairan: ia membandingkan jumlah setiap ion yang tertangkap dengan jumlah yang tidak tertangkap, lalu membandingkan dua keseimbangan tersebut. Karena itu nilainya dapat terus naik ketika lebih banyak bahan diambil, bahkan jika faktor pengayaan mengikuti pola yang berbeda.

Kemurnian adalah proporsi ion yang dipilih dalam fraksi yang diperoleh kembali. Demonstrasi dua tahap mencapai sekitar **97.0% kemurnian neodimium** dan **92.3% kemurnian disprosium** pada jalur yang ditentukan.

Pengurangan adalah fraksi yang dihilangkan dari larutan awal. Delapan penambahan berurutan masing-masing 10 miligram bubuk menghilangkan **72% disprosium** dalam uji neodimium-disprosium dan menghasilkan faktor pemisahan terakumulasi sebesar 10.8.

Pemulihan menanyakan berapa banyak ion yang sudah tertangkap dapat dilepaskan kembali. Pertukaran ion balik memulihkan **80%** dalam satu operasi neodimium-disprosium. Pelepasan elektrokimia memulihkan **89%** dalam satu operasi lantanum-neodimium.

Pemulihan menunjukkan bahwa proses dapat dibalik. Itu tidak menetapkan berapa kali elektroda dapat digunakan kembali sambil mempertahankan kinerjanya.



Empat metrik yang dilaporkan menggunakan penyebut yang berbeda dan berasal dari eksperimen yang berbeda. Ini adalah kartu bukti, bukan tahapan berurutan dari satu proses.

The Clean Paper CC BY 4.0

Mengapa dua persentase yang mengesankan bisa berarti hal yang berbeda?

Misalkan sebuah proses menghilangkan 90% salah satu ion dari cairan awal. Itu adalah pengurangan yang tinggi. Jika banyak ion yang tidak diinginkan ikut terbawa, bahan yang dipulihkan tetap dapat memiliki kemurnian rendah. Sebaliknya, sebuah fraksi kecil yang sangat murni dapat berarti pemulihan yang buruk jika sebagian besar target tertinggal. Penilaian proses membutuhkan semua neraca ini, bukan sekadar angka terbesar.

Perangkat yang didemonstrasikan masih merupakan eksperimen gelas beker

Uji elektrokimia yang berorientasi pada skala dimulai dengan **5 mililiter** larutan yang mengandung 25 milimol per liter dari setiap ion. Elektroda membawa sekitar **25 hingga 40 miligram** bahan aktif.

Satu elektroda menghilangkan sekitar 40% neodimium. Tiga elektroda yang digunakan secara seri mencapai sekitar **90% pengurangan** dan faktor pemisahan terakumulasi sebesar **16.6 +/- 0.4**. Bergantung pada laju operasi, reaksi berlangsung dari **200 menit hingga 13 jam**.

Ukuran dan waktu tersebut perlu menjadi bagian utama cerita karena itulah yang menentukan apa

yang benar-benar telah didemonstrasikan.

Suplemen juga mengidentifikasi batas perpindahan massa. Untuk target gelas beker dengan konsentrasi lebih tinggi, mencapai 50% pengurangan total diperkirakan memerlukan **elektroda 266 miligram**, atau **532 miligram bahan aktif per sentimeter persegi**. Memuat begitu banyak bahan pada elektroda kecil akan menyulitkan ion terlarut untuk mencapai seluruh bagiannya. Karena itu, penulis beralih ke larutan yang lebih encer untuk eksperimen gelas beker.

Sel alir hipotetis hanya muncul sebagai proyeksi. Untuk sel yang diasumsikan berukuran 1.25 mililiter dengan elektroda 5 x 5 sentimeter, suplemen memperkirakan sekitar **20 menit pada 1C** atau **40 menit pada 0.5C** untuk sekitar 90% pengurangan. Tidak ada eksperimen sel alir seperti itu yang dilaporkan.

Tangga bukti berakhir pada sebuah batas: tersedia bukti laboratorium biner dan bertahap, sementara waktu operasi aliran dan kinerja lingkungan masih berupa proyeksi atau berbasis skenario, bukan didemonstrasikan pada skala pabrik.

The Clean Paper CC BY 4.0

Perbandingan lingkungan adalah skenario, bukan hasil pabrik

Penilaian daur hidup dalam suplemen membandingkan tahap pemisahan yang berakhir pada oksida tanah jarang dan melaporkan input per **1 kilogram oksida neodimium**.

Analisis itu tidak mencakup penambangan, praperlakuan bijih, atau rantai pemurnian komersial yang lengkap. Proses laboratorium direpresentasikan menggunakan asumsi yang dirangkai dari berbagai sumber. Umur elektroda **10, 20, dan 100 siklus** adalah nilai skenario dan sensitivitas, bukan daya tahan yang diukur dalam studi ini. Model mengasumsikan larutan pemulihan magnesium dapat digunakan kembali sampai konsentrasinya berubah 10%, mengasumsikan **95% daur ulang air**, dan memasukkan kalsinasi pada 450-600 derajat Celsius selama dua jam meskipun kalsinasi tidak didemonstrasikan secara eksperimental di sini.

Penilaian daur hidup menghitung beban lingkungan di dalam batas sistem yang dinyatakan. Jawabannya hanya seluas batas tersebut dan hanya seandal inventaris serta asumsi skalanya.

Analisis ini dapat menunjukkan di mana energi, bahan, dan penggunaan kembali paling berpengaruh. Analisis itu tidak dapat membuktikan bahwa versi komersial akan memiliki dampak lingkungan lebih rendah daripada ekstraksi pelarut industri.

Sebuah mekanisme, sebuah platform, dan perjalanan rekayasa yang panjang

Makalah ini menunjukkan bahwa jarak dan lingkungan kimia padatan berlapis terhidrasi dapat dikendalikan secara sengaja untuk memperbaiki pemisahan pasangan lantanida tertentu. Penahanan magnesium tidak sekadar menambahkan lokasi ikatan kimia lain: ia membatasi struktur yang harus dilalui ion berbalut air.

Hasil itu membuka pertanyaan praktis. Apakah kinerja dapat bertahan pada campuran nyata yang berasal dari bijih? Dapatkah elektroda dibuat dengan muatan massa yang layak? Seberapa stabil oksida mangan selama banyak siklus penyisipan dan pelepasan? Dapatkah sel kontinu mempertahankan selektivitas, laju pemrosesan, dan neraca air? Seperti apa perbandingan lingkungan jika menggunakan inventaris yang benar-benar diukur pada skala pilot?

Eksperimen ini tidak menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut. Ia membuatnya menjadi lebih konkret.

Pencapaiannya bukan kilang tanah jarang yang sudah jadi. Pencapaiannya adalah bukti bahwa beberapa angstrom ruang berisi air yang dikendalikan dapat mengubah pemisahan yang sulit.

Singkatnya

Para peneliti menggunakan oksida mangan berlapis terhidrasi untuk memisahkan pasangan ion lantanida tertentu di dalam air. Celah bebas bahan sekitar 6.8-6.9 angstrom, dekat dengan diameter 6.6-7.1 angstrom yang dilaporkan untuk selubung hidrasi pertama ion tersebut. Magnesium yang tertahan membantu menjaga kanal dan meningkatkan pengayaan spesifik-pasangan, termasuk lantanum-neodimium dari 1.6 menjadi 5.4 dan lantanum-praseodimium dari 1.5 menjadi 4.2. Studi

juga melaporkan uji terhadap ion yang melimpah, kemurnian bertahap, pengurangan berurutan, dan operasi pemulihan. Skala yang didemonstrasikan tetap berupa uji gelas beker 5 mililiter dengan 25-40 miligram bahan aktif dan waktu reaksi 200 menit hingga 13 jam. Waktu sel alir hanya diproyeksikan, penggunaan ulang selama banyak siklus tidak diuji, dan perbandingan daur hidup bergantung pada asumsi skala laboratorium. Makalah mendukung mekanisme pembatasan ruang dan sebuah platform laboratorium, bukan pengganti industri untuk ekstraksi pelarut.

Penilaian tanpa berlebihan

Apa yang ditunjukkan makalah: Menahan celah oksida mangan terhidrasi pada sekitar 6.8-6.9 angstrom dengan magnesium yang tetap berada di dalamnya mengubah pemisahan pasangan lantanida tertentu. Pengukuran struktur, elektrokimia, dan perhitungan mendukung mekanisme yang melibatkan pembatasan ruang, dehidrasi, koordinasi, dan pengikatan.

Apa yang berkinerja paling baik: Pada kondisi yang ditentukan, pengayaan lantanum-neodimium mencapai 5.4 +/- 0.1 dan lantanum-praseodimium mencapai 4.2 +/- 0.1. Nilai untuk pasangan lain berbeda. Eksperimen terpisah melaporkan hasil kemurnian, pengurangan, dan pemulihan yang menggunakan penyebut berbeda.

Apa yang tidak ditunjukkan: Pemisah universal untuk semua unsur tanah jarang; operasi pada aliran bijih lengkap; sel alir kontinu yang telah didemonstrasikan; elektroda tahan banyak siklus; penggantian ekstraksi pelarut; atau keunggulan lingkungan komersial yang telah dibuktikan.

Batas skala utama: Uji yang didemonstrasikan menggunakan 5 mililiter larutan, sekitar 25-40 miligram bahan aktif, dan 200 menit hingga 13 jam. Target dengan konsentrasi lebih tinggi menyiratkan masalah muatan 532 miligram per sentimeter persegi. Waktu aliran diekstrapolasi. Umur elektroda dan masukan daur ulang utama dalam penilaian daur hidup merupakan asumsi.

Seberapa besar keyakinan yang sebaiknya dimiliki pembaca umum? Keyakinan tinggi pada pengukuran laboratorium yang dilaporkan untuk pasangan dan kondisi yang disebutkan. Keyakinan sedang pada interpretasi molekuler yang diajukan karena interpretasi itu menggabungkan struktur dan elektrokimia langsung dengan perhitungan. Keyakinan rendah bahwa data saat ini dapat memprediksi laju pemrosesan, umur pakai, atau kinerja lingkungan pada skala industri.

Sumber

Zou et al., Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026)
https://doi.org/10.1038/s44286-026-00418-8