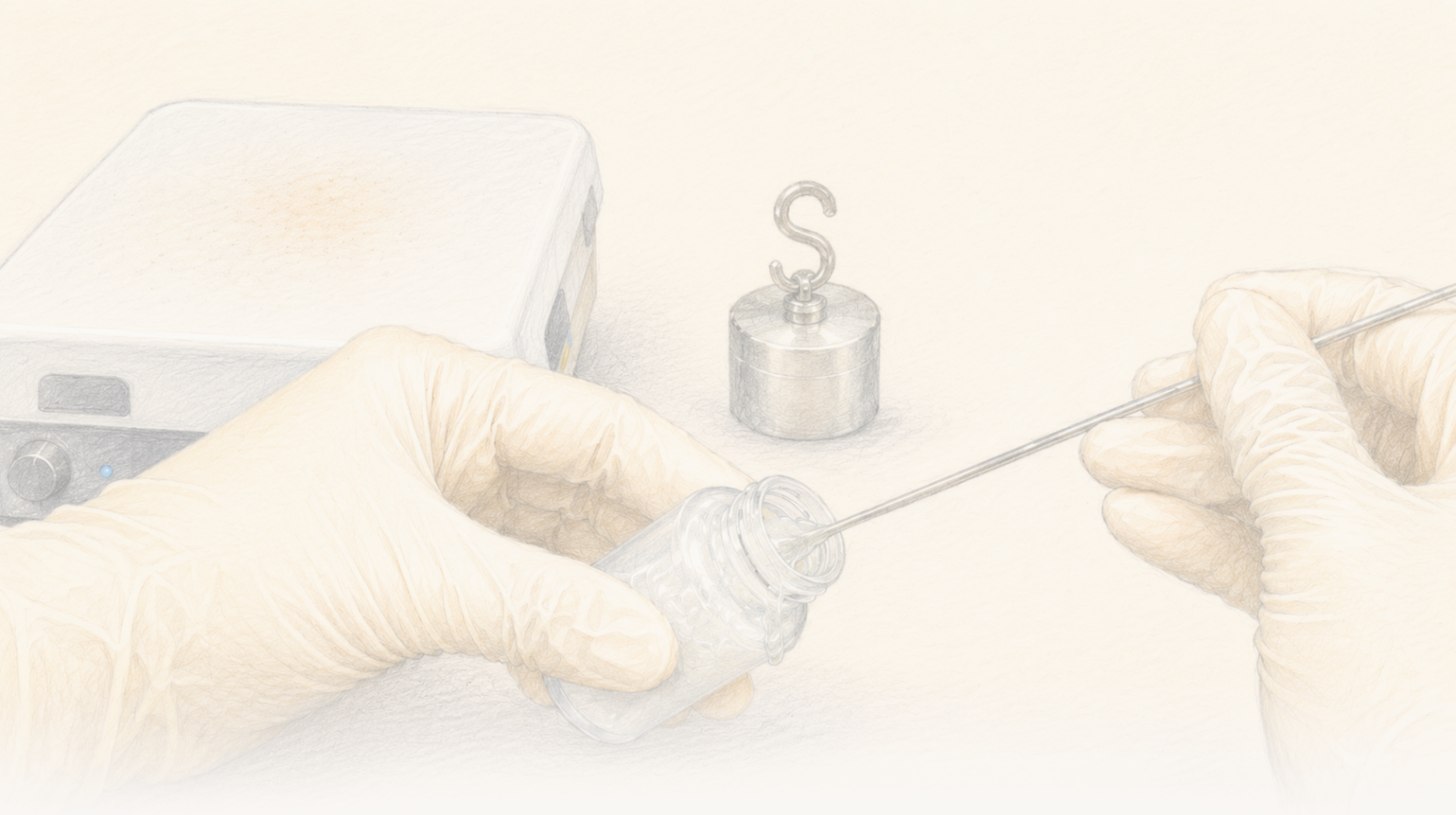


The Clean Paper

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

Sebuah molekul kecil merekatkan PTFE tanpa perlakuan, lalu dapat dicuci dengan etanol

Sebuah makalah JACS melaporkan perekat fosfat fluoro-crown ether yang merekatkan PTFE yang terkenal inert dalam uji lap-shear laboratorium sekaligus tetap dapat dihilangkan dengan pencucian etanol. CyclicFP-fmoc mencapai 1,3 MPa pada PTFE tanpa perlakuan dengan kegagalan kohesif yang ulet, dan varian terkait mencapai 2,3 MPa. Mekanismenya didukung bukti spektroskopi untuk interaksi fluor-fluor pada PTFE serta ikatan hidrogen dan penumpukan pi di dalam perekat. Ini adalah hasil material yang menjanjikan, belum merupakan lem komersial, solusi daur ulang universal, atau penilaian lengkap keselamatan lingkungan.

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

Paper: *Small-Molecule Adhesives with Strong and Ductile Adhesion to PTFE, Yet Allowing Easy Wipe-Off Removal*, Kohei Kikkawa, Abir Goswami, Kiyoshi Morishita, Hao Wang, Takashi Nakamura, and Takuzo Aida, Journal of the American Chemical Society 148, 29138-29145 (2026) · DOI: 10.1021/jacs.6c07886

PTFE sulit direkatkan karena alasan yang mendasar

Politetrafluoroetilena, yang lebih dikenal sebagai PTFE dan dijual dengan nama dagang termasuk Teflon, berguna sebagian karena material ini enggan berinteraksi. Energi permukaannya rendah. Banyak cairan membentuk butiran di atasnya. Banyak lem gagal menempel kecuali permukaannya dietsa, dikasarkan, diberi perlakuan plasma, atau dipasangkan dengan primer khusus.

Ketahanan itu sangat berguna untuk pelapis antilengket dan komponen yang inert secara kimia. Namun sifat yang sama menjadi masalah ketika insinyur ingin menyambungkan PTFE dengan komponen lain tanpa merusak permukaannya secara permanen.

Sebuah makalah di Journal of the American Chemical Society melaporkan perekat molekul kecil yang menyerang masalah tersebut dari arah yang tidak biasa. Kohei Kikkawa, Abir Goswami, dan rekan-rekannya menjelaskan molekul fosfat fluoro-crown ether yang dapat menempel kuat pada PTFE tanpa perlakuan permukaan, mengalami deformasi ulet sebelum gagal, lalu dapat dihilangkan dari pelat PTFE dengan pencucian etanol.

Molekul utama disebut **CyclicFP-fmoc**. Dalam uji geser tumpang tindih, molekul ini merekatkan pelat PTFE tanpa perlakuan dengan kekuatan adhesi **1,3 ± 0,1 MPa** dan kerja pelepasan ikatan **1300 N/m**. Karena 1 MPa sama dengan 1 newton per milimeter persegi, tegangan puncak terukur 1,3 MPa setara dengan tekanan kira-kira berat sebuah apel 130 gram yang bekerja pada setiap milimeter persegi. Ini adalah analogi per satuan luas, bukan gaya atau geometri kontak spesimen uji. Kerja pelepasan ikatan yang dilaporkan, 1300 N/m, setara dengan energi pemisahan 1300 joule per meter persegi. Sebagai demonstrasi visual langsung, bukan peringkat beban rekayasa, makalah menunjukkan sambungan seluas 7 cm^2 yang menopang beban 8 kg. Sambungan gagal di dalam lapisan perekat, bukan pada antarmuka PTFE. Ini penting: berarti antarmuka bukan titik terlemah dalam pengujian tersebut.

Ilustrasi pensil berdasarkan foto dalam makalah yang menunjukkan strip perekat menopang beban yang digantung (Gambar 2, kiri). Ini bukan foto asli, bukan gambar berskala, dan bukan diagram peringkat beban rekayasa.

AI-generated adaptation — The Clean Paper; source photograph: Kikkawa et al., JACS 2026, Figure 2 (left) Fair-use assertion

Hasilnya bukan berarti “masalah PTFE sudah selesai.” Ini adalah hasil ilmu material dalam kondisi laboratorium terkontrol. Namun hasil ini memberi contoh yang jelas tentang kombinasi yang sulit dicapai: adhesi kuat, kegagalan ulet, dan kemampuan menghapus perekat dari permukaan yang terkenal sulit ditempeli.

Mengapa kekuatan tinggi dan pelepasan mudah saling bertentangan

Perekat biasanya harus berkompromi. Lem polimer berikatan silang yang kaku dapat sangat kuat, tetapi sering gagal mendadak dan sulit dihilangkan dengan bersih. Perekat lunak seperti selotip dapat meregang dan membuang energi, tetapi biasanya mengorbankan kekuatan.

Pertukarannya berada pada tingkat molekuler. Kekuatan membutuhkan transfer tegangan yang efisien. Keuletan membutuhkan gerak, penataan ulang, dan disipasi energi. Pelepasan yang mudah

membutuhkan ikatan yang dapat diputus tanpa merusak substrat. Ketiga tuntutan tersebut menarik sistem ke arah yang berbeda.

Perekat molekul kecil menarik karena, setidaknya secara prinsip, dapat dilepas dan didaur ulang. Mereka tidak membentuk jejaring polimer panjang yang saling terlilit dan membuat banyak lem konvensional tangguh. Tetapi itu juga kelemahannya: tanpa lilitan tersebut, molekul kecil biasanya kesulitan menghasilkan adhesi kuat sekaligus ulet.

Makalah JACS ini mencoba menggantikan lilitan polimer dengan rangkaian interaksi nonkovalen yang reversibel. Molekulnya menggabungkan wilayah fosfat crown ether berfluorin dengan gugus fmoc yang dihubungkan oleh urethane. Secara sederhana, cincin berfluorinnya dapat berinteraksi dengan permukaan PTFE yang kaya fluor, gugus urethanenya dapat membentuk ikatan hidrogen dengan molekul perekat tetangga, dan gugus fluorenilnya yang datar dapat saling bertumpuk. Sasaran desainnya bukan satu ikatan ajaib, melainkan sekumpulan interaksi lemah dan reversibel yang bekerja bersama:

- interaksi fluor-fluor dekat PTFE;
- ikatan hidrogen antar-molekul perekat;
- penumpukan pi-pi antar-gugus fluorenil;
- dan mobilitas molekuler yang cukup untuk merelaksasi tegangan alih-alih langsung retak.

Apa yang ditunjukkan uji utama pada PTFE

Para penulis menempatkan CyclicFP-fmoc di antara pelat PTFE yang tidak diberi perlakuan permukaan maupun dibersihkan, memanaskan perekat, lalu membiarkan pelat pada suhu ruang selama 10 menit sebelum pengujian.

Untuk pengujian kuantitatif, mereka menggunakan lap shear. Pelat PTFE yang direkatkan dengan CyclicFP-fmoc mencapai tegangan tarik **1,3 ± 0,1 MPa**, dilaporkan sebagai rata-rata ± simpangan baku dari tiga pengukuran. Mengaplikasikan perekat pada sekitar **50 C** dengan pengering rambut memberi nilai serupa, **1,1 ± 0,1 MPa**, sehingga tidak hanya dapat digunakan dengan peleburan bersuhu tinggi.

Para penulis membandingkan nilai tersebut dengan perekat komersial epoksi, akrilik, silikon, dan urethane dalam konfigurasi lap-shear PTFE yang sama. Kontrol tersebut mencapai sekitar **0,1 hingga 0,7 MPa**, dibandingkan dengan **1,3 ± 0,1 MPa** untuk CyclicFP-fmoc. Perbandingan pada substrat dan metode yang sama jauh lebih informatif daripada menempatkan angka MPa dari bahan dan geometri uji berbeda dalam satu daftar peringkat.

Nilainya tetap serupa setelah penyimpanan. Setelah 30 hari pada kondisi sekitar, kekuatan adhesinya **1,3 ± 0,2 MPa**. Setelah pelat dipisahkan secara paksa, ditumpangtindihkan lagi, dan dipanaskan ulang, kekuatannya **1,2 ± 0,2 MPa**. Bahkan setelah siklus tersebut diulang sepuluh kali, hasilnya masih sekitar **1,3 ± 0,3 MPa**.

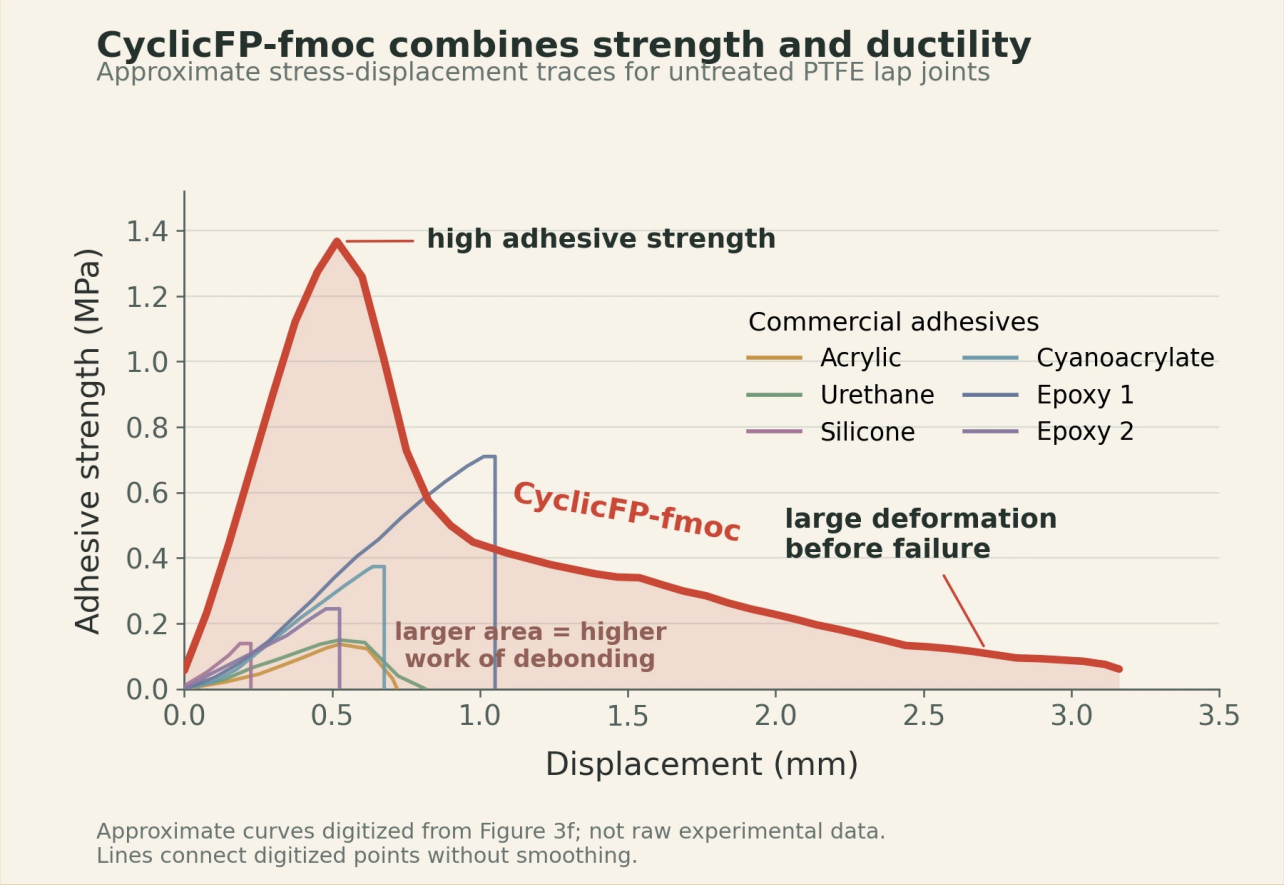
Varian terbaik justru bukan molekul utama. Molekul terkait dengan tiga gugus fmoc, **CyclicFP-fmoc3**,

mencapai **2,3 ± 0,2 MPa** pada PTFE. Makalah tetap banyak berfokus pada CyclicFP-fmoc karena molekul inilah yang memberi kombinasi lengkap antara kekuatan, keuletan, bukti mekanistik, dan pelepasan dengan pencucian.

Keuletan adalah separuh kedua klaimnya

Kekuatan saja tidak cukup. Perekat rapuh dapat mencapai tegangan puncak tinggi lalu gagal mendadak. Klaim yang lebih khas dalam makalah adalah bahwa CyclicFP-fmoc juga berperilaku ulet.

Pada kurva lap-shear, CyclicFP-fmoc mencapai tegangan maksimum lalu kehilangan tegangan secara bertahap ketika perpindahan terus berlanjut. Perekat komersial yang diuji dalam makalah berperilaku lebih seperti sambungan rapuh: kegagalan terjadi segera setelah tegangan puncaknya.



CyclicFP-fmoc menggabungkan puncak tegangan tinggi dengan ekor pascapuncak yang panjang; area berarsir adalah panduan editorial terhadap kerja pelepasan ikatannya yang lebih besar. Kurva perkiraan didigitalkan dari Gambar 3f; bukan data eksperimen mentah.

Chart by The Clean Paper; approximate values digitized from Kikkawa et al., JACS 2026, Figure 3f (source figure not relicensed) CC BY 4.0

Para penulis mengkuantifikasi luas di bawah kurva tegangan-perpindahan sebagai kerja pelepasan ikatan. CyclicFP-fmoc menghasilkan **1300 N/m** pada PTFE. Perekat komersial yang diuji berada antara **26 hingga 314 N/m**.

Mode kegagalannya sesuai dengan interpretasi itu. Sambungan PTFE dengan CyclicFP-fmoc gagal secara kohesif, di dalam perekat. Ini menunjukkan bahwa perekat dapat membuang energi melalui deformasi internal, sementara antarmuka PTFE lebih kuat daripada lapisan perekat curah dalam pengujian tersebut.

Eksperimen relaksasi tegangan menambahkan skala waktu molekuler. Pada 20 C, waktu relaksasi karakteristik adalah **60 ms**, dan analisis Arrhenius menghasilkan energi aktivasi **33,8 kJ/mol**. Secara sederhana, lapisan perekat dapat menata ulang cukup cepat untuk melunakkan konsentrasi tegangan mendadak, alih-alih berperilaku sebagai padatan rapuh yang statis.

Mengapa para penulis menganggap fluor penting

PTFE tersusun dari ikatan karbon-fluor. CyclicFP-fmoc membawa gugus crown ether berfluorin. Para penulis berpendapat bahwa **interaksi F-F** membantu perekat menempel pada PTFE, sementara interaksi lain membantu lapisan perekat tetap menyatu dan berdeformasi.

Beberapa eksperimen kontrol menunjuk ke arah tersebut. Ketika atom fluor dalam CyclicFP-fmoc diganti dengan atom hidrogen, CyclicP-fmoc yang dihasilkan merekat pada PTFE jauh lebih lemah, sekitar **0,1 ± 0,0 MPa**. Fosfat fluoro-eter linear, AcyclicFP-fmoc, hanya mencapai **0,3 ± 0,1 MPa**. Varian yang kehilangan unit penumpukan pi atau ikatan hidrogen juga berkinerja lebih buruk.

Makalah lalu menggunakan spektroskopi dan struktur kristal untuk mendukung gambaran interaksi tersebut. Dalam kristal CyclicFP-fmoc, atom fluor pada molekul tetangga berjarak **2,49 hingga 2,91 angstrom**, lebih pendek daripada jumlah van der Waals **2,94 angstrom** untuk dua atom fluor. FT-IR dan NMR suhu-variabel mendukung adanya ikatan hidrogen, interaksi F-F, dan penumpukan pi-pi dalam perekat amorf.

Yang paling langsung terkait PTFE, spektrum **19F MAS NMR** keadaan padat bergeser ketika CyclicFP-fmoc dicampur dengan nanopartikel PTFE atau lembaran tipis PTFE. Kontrol tanpa fluor tidak menghasilkan pergeseran yang sama. Ini merupakan bukti, bukan sekadar sketsa desain, bahwa bagian berfluorin dari perekat berinteraksi dengan PTFE.

Namun ini tetap tidak boleh disederhanakan menjadi “ikatan F-F menyelesaikan PTFE.” Model dalam makalah sendiri lebih berlapis: interaksi F-F di antarmuka membantu adhesi pada PTFE, sedangkan ikatan hidrogen dan penumpukan pi-pi berkontribusi terhadap kohesi serta keuletan di dalam perekat.

Pelepasan dengan pencucian memang nyata, tetapi cakupannya terbatas

Hasil pelepasan merupakan daya tarik praktis utama. Para penulis mencuci pelat PTFE yang telah dipisahkan dengan etanol dan melaporkan penghilangan lengkap CyclicFP-fmoc tanpa residu dalam

demonstrasi mereka. Mereka juga memulihkan perekat dan menggunakannya kembali berulang kali, mempertahankan kekuatan adhesi sekitar **1,2 ± 0,1 MPa** dalam uji penggunaan kembali.

Ini penting karena perekat kuat konvensional sering sulit dihilangkan secara bersih. Lem yang dapat menahan PTFE lalu dicuci saat diperlukan akan berguna untuk perbaikan, pembongkaran, dan penggunaan ulang.

Tetapi batasannya penting. Makalah menguji sampel terkontrol, bukan semua permukaan industri yang terkontaminasi, sambungan yang telah terpapar cuaca, paparan pelarut, atau kondisi penuaan jangka panjang. Pelepasan dengan etanol pada pelat PTFE tidak sama dengan membuktikan proses daur ulang lengkap untuk rakitan yang terbuat dari banyak bahan.

Makalah juga menyatakan bahwa CyclicFP-fmoc bukan PFAS "forever chemical". Pernyataan itu tidak boleh diperluas menjadi penilaian risiko lingkungan yang lengkap. Persistensi, toksisitas, skala manufaktur, jalur pelepasan, dan regulasi adalah pertanyaan yang berbeda.

Apa yang tidak dibuktikan penelitian ini

- Penelitian ini **tidak** menunjukkan produk perekat yang siap dipasarkan.
- Penelitian ini **tidak** membuktikan bahwa PTFE kini dapat direkatkan secara andal di setiap lingkungan industri tanpa persiapan permukaan.
- Penelitian ini **tidak** menunjukkan bahwa pelepasan dengan etanol bekerja sama baiknya pada setiap substrat, kondisi permukaan, atau sambungan yang telah menua.
- Penelitian ini **tidak** membuktikan bahwa interaksi F-F saja menjelaskan adhesi. Mekanisme yang diusulkan menggabungkan F-F, ikatan hidrogen, dan penumpukan pi-pi.
- Penelitian ini **tidak** menunjukkan alur kerja daur ulang plastik yang lengkap.
- Penelitian ini **tidak** menetapkan profil keselamatan lingkungan atau toksikologi yang lengkap bagi molekul perekat.
- Penelitian ini **tidak** berarti perekat komersial secara umum lebih buruk. Perbandingan hanya berlaku pada bahan dan konfigurasi lap-shear PTFE yang diuji dalam makalah ini.

Seberapa kuat hasilnya?

Untuk sebuah makalah material laboratorium, hasilnya kuat karena para penulis tidak hanya melaporkan satu angka tinggi. Mereka menguji kekuatan, keuletan, ketahanan selama 30 hari, toleransi terhadap air, perekatan ulang berulang, pelepasan dengan etanol, varian molekuler, dan bukti spektroskopi bagi interaksi yang diusulkan.

Kombinasi paling meyakinkan adalah mode kegagalan ditambah eksperimen kontrol. Jika antarmuka PTFE gagal terlebih dahulu, klaimnya akan lebih lemah. Sebaliknya, sambungan gagal di dalam lapisan perekat. Dan ketika struktur siklik berfluorin dihilangkan atau diubah, adhesi pada PTFE turun tajam.

Pertanyaan yang tersisa adalah skala dan kasus penggunaan. Uji lap-shear terstandar dan berguna, tetapi sambungan nyata mengalami peel, benturan, kelelahan, kontaminasi, siklus suhu, dan bahan campuran. Molekul yang bekerja sangat baik di antara pelat laboratorium terkontrol masih harus menjadi formulasi, proses, dan kumpulan data ketahanan sebelum menjadi perekat rekayasa.

Mengapa ini penting

PTFE berada pada batas material yang serba sulit. Sifat inertnya adalah fitur yang membuatnya berharga, dan fitur yang sama membuatnya sulit diintegrasikan ke dalam rakitan yang mudah diperbaiki atau didaur ulang.

Makalah ini menawarkan pendekatan yang spesifik secara kimia, bukan mengandalkan kekerasan proses. Alih-alih mengasarkan atau menyerang permukaan PTFE secara kimia, mereka merancang molekul kecil yang dapat berinteraksi dengan permukaan tersebut sambil mempertahankan lapisan perekat yang ulet dan reversibel.

Jika logika desain ini dapat digeneralisasi, ia dapat membantu membangun perekat yang lebih mudah dilepas dan digunakan kembali tanpa kehilangan seluruh kinerja mekanisnya. Itulah janji sebenarnya: bukan satu molekul sebagai lem jadi, melainkan strategi molekuler untuk adhesi yang kuat, ulet, dan dapat dilepaskan.

Singkatnya

Kikkawa, Goswami, dan rekan-rekannya melaporkan molekul kecil fosfat fluoro-crown ether sebagai perekat untuk PTFE dan substrat lain. Molekul utama, CyclicFP-fmoc, merekatkan pelat PTFE tanpa perlakuan dengan kekuatan 1,3 ± 0,1 MPa dalam uji lap-shear, gagal secara kohesif alih-alih pada antarmuka PTFE, menunjukkan kerja pelepasan ikatan 1300 N/m, mempertahankan kinerja setelah penyimpanan dan perekatan ulang berulang, serta dapat dihilangkan dari pelat PTFE dengan pencucian etanol. Varian terkait mencapai 2,3 ± 0,2 MPa. Spektroskopi dan molekul kontrol mendukung mekanisme di mana interaksi F-F membantu antarmuka PTFE, sedangkan ikatan hidrogen dan penumpukan pi-pi membantu lapisan perekat membuang tegangan. Hasil ini merupakan demonstrasi laboratorium yang menjanjikan tentang adhesi kuat, ulet, dan dapat dicuci dari PTFE, tetapi belum merupakan lem komersial, solusi daur ulang universal, atau penilaian keselamatan lingkungan yang lengkap.

Sumber

Kikkawa et al., Small-Molecule Adhesives with Strong and Ductile Adhesion to PTFE, Yet Allowing Easy Wipe-Off Removal, Journal of the American Chemical Society 148, 29138-29145 (2026)
https://doi.org/10.1021/jacs.6c07886