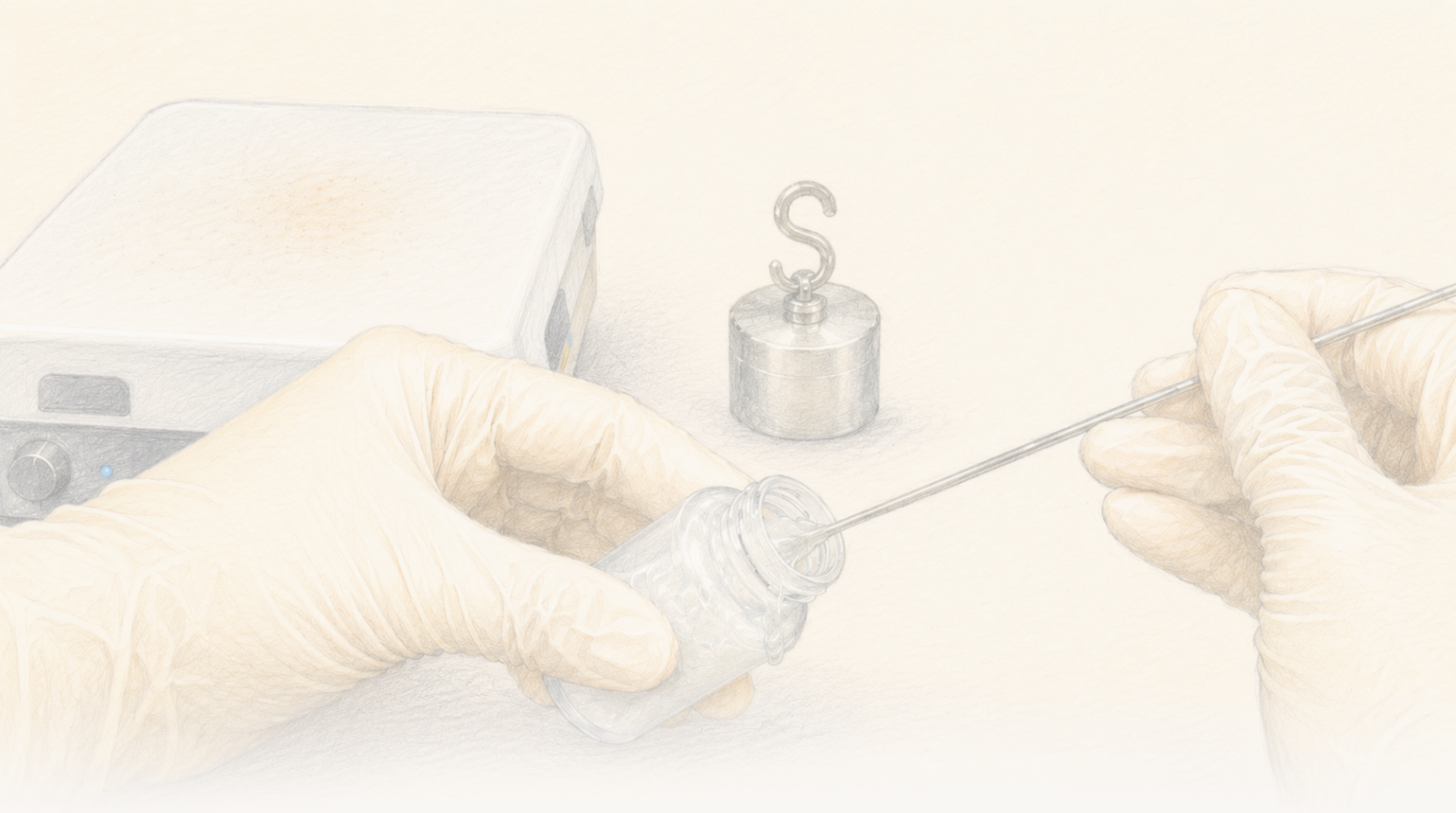


The Clean Paper

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

Molekul kecil melekatkan PTFE tanpa rawatan — kemudian boleh ditanggalkan dengan etanol

Kertas JACS melaporkan pelekat fosfat eter mahkota berfluorin yang melekat pada PTFE yang terkenal lengai dalam ujian ricih tindih makmal, tetapi masih boleh ditanggalkan dengan pembasuhan etanol. CyclicFP-fmoc mencapai 1.3 MPa pada PTFE tanpa rawatan dengan kegagalan kohesif yang mulur, manakala varian berkaitan mencapai 2.3 MPa. Bukti spektroskopi menyokong peranan interaksi fluorin–fluorin pada PTFE serta ikatan hidrogen dan susunan π–π di dalam pelekat. Ini hasil sains bahan yang menjanjikan, tetapi belum merupakan gam komersial, penyelesaian kitar semula sejagat atau penilaian keselamatan alam sekitar yang lengkap.

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 sukar dilekatkan kerana sebab yang asas

Politetrafluoroetilena, yang lebih dikenali sebagai PTFE dan dijual dengan nama dagang termasuk Teflon, berguna sebahagian kerana bahan ini enggan berinteraksi. Tenaga permukaannya rendah. Banyak cecair membentuk butiran di atasnya. Banyak gam gagal melekat kecuali permukaannya dietsa, dikasarkan, diberi rawatan 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 merosakkan permukaannya secara permanen.

Sebuah makalah di Journal of the American Chemical Society melaporkan pelekat molekul kecil yang menyerang masalah tersebut dari arah yang tidak biasa. Kohei Kikkawa, Abir Goswami, dan rakan-rakannya menerangkan molekul fosfat eter mahkota berfluorin yang dapat melekat kuat pada PTFE tanpa rawatan permukaan, mengalami deformasi mulur sebelum gagal, lalu dapat ditanggalkan daripada plat PTFE dengan pembasuhan etanol.

Molekul utama disebut **CyclicFP-fmoc**. Dalam ujian geser tumpang tindih, molekul ini melekatkan plat PTFE tanpa rawatan dengan kekuatan lekatan **1,3 ± 0,1 MPa** dan kerja pemisahan **1300 N/m**. Kerana 1 MPa sama dengan 1 newton per milimeter persegi, tegasan puncak boleh diukur 1,3 MPa setara dengan tekanan kira-kira berat sebuah apel 130 gram yang berfungsi pada setiap milimeter persegi. Ini adalah analogi per unit luas, bukan daya atau geometri sentuhan spesimen ujian. Kerja pemisahan yang dilaporkan, 1300 N/m, setara dengan tenaga pemisahan 1300 joule per meter persegi. Sebagai demonstrasi visual langsung, bukan peringkat beban kejuruteraan, makalah menunjukkan sambungan seluas 7 cm^2 yang menopang beban 8 kg. Sambungan gagal di dalam lapisan pelekat, bukan pada antara muka PTFE. Ini penting: bermakna antara muka bukan titik terlemah dalam ujian tersebut.

Ilustrasi pensil berdasarkan foto dalam makalah yang menunjukkan strip pelekat menopang beban yang digantung (Imej 2, kiri). Ini bukan foto asli, bukan imej berskala, dan bukan rajah peringkat beban kejuruteraan.

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

Hasilnya bukan bermakna “masalah PTFE telah selesai.” Ini adalah hasil sains bahan dalam keadaan makmal terkawal. Namun hasil ini memberi contoh yang jelas tentang gabungan yang sukar dicapai: lekatan kuat, kegagalan mulur, dan keupayaan menghapuskan pelekat daripada permukaan yang terkenal sukar ditempeli.

Mengapa kekuatan tinggi dan penanggalan mudah saling bertentangan

Pelekat biasanya perlu berkompromi. Gam polimer berikatan silang yang tegar boleh menjadi sangat kuat, tetapi sering gagal mendadak dan sukar dihapuskan dengan bersih. Pelekat lunak seperti pita pelekat dapat meregang dan membuang tenaga, tetapi biasanya mengorbankan kekuatan.

Pertukarannya berada pada tahap molekul. Kekuatan memerlukan transfer tegasan yang cekap. Kemuluran memerlukan gerak, penataan ulang, dan disipasi tenaga. Pelepasan yang mudah

memerlukan ikatan yang dapat diputus tanpa merosakkan substrat. Ketiga tuntutan tersebut menarik sistem ke arah yang berbeza.

Pelekat molekul kecil menarik kerana, sekurang-kurangnya secara prinsip, dapat dilepas dan dikitar semula. Mereka tidak membentuk rangkaian polimer panjang yang saling terlilit dan membuat banyak gam konvensional tangguh. Tetapi itu juga kelemahannya: tanpa belitan tersebut, molekul kecil biasanya sukar menghasilkan lekatan kuat serentak mulur.

Makalah JACS ini mencuba menggantikan belitan polimer dengan rangkaian interaksi nonkovalen yang reversibel. Molekulnya menggabungkan kawasan fosfat crown ether berfluorin dengan gugus fmoc yang dihubungkan oleh urethane. Secara ringkas, cincin berfluorinnya dapat berinteraksi dengan permukaan PTFE yang kaya fluorin, gugus urethanenya dapat membentuk ikatan hidrogen dengan molekul pelekat jiran, dan gugus fluorenilnya yang datar dapat saling bertumpuk. Sasaran desainnya bukan satu ikatan ajaib, melainkan sekumpulan interaksi lemah dan reversibel yang berfungsi bersama:

- interaksi fluorin-fluorin dekat PTFE;
- ikatan hidrogen antar-molekul pelekat;
- pengumpulan pi-pi antar-gugus fluorenil;
- dan mobilitas molekul yang cukup untuk merelaksasi tegasan bukannya langsung retak.

Apa yang ditunjukkan ujian utama pada PTFE

Para penulis menempatkan CyclicFP-fmoc di antara plat PTFE yang tidak diberi rawatan permukaan mahupun dibersihkan, memanaskan pelekat, lalu membiarkan plat pada suhu ruang selama 10 minit sebelum ujian.

Untuk ujian kuantitatif, mereka menggunakan lap shear. Plat PTFE yang dilekatkan dengan CyclicFP-fmoc mencapai tegasan tarik **1,3 ± 0,1 MPa**, dilaporkan sebagai purata ± sisihan piawai dari tiga pengukuran. Mengaplikasikan pelekat 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 pelekat komersial epoksi, akrilik, silikon, dan urethane dalam konfigurasi ricih tindih PTFE yang sama. Kawalan tersebut mencapai sekitar **0,1 hingga 0,7 MPa**, berbanding dengan **1,3 ± 0,1 MPa** untuk CyclicFP-fmoc. Perbandingan pada substrat dan kaedah yang sama jauh lebih informatif daripada menempatkan angka MPa daripada bahan dan geometri ujian berbeza dalam satu daftar peringkat.

Nilainya tetap serupa selepas penyimpanan. Selepas 30 hari pada keadaan sekitar, kekuatan adhesinya **1,3 ± 0,2 MPa**. Selepas plat diasingkan secara paksa, ditumpangtindihkan lagi, dan dipanaskan ulang, kekuatannya **1,2 ± 0,2 MPa**. Malah selepas kitaran tersebut diulang sepuluh kali, hasilnya masih sekitar **1,3 ± 0,3 MPa**.

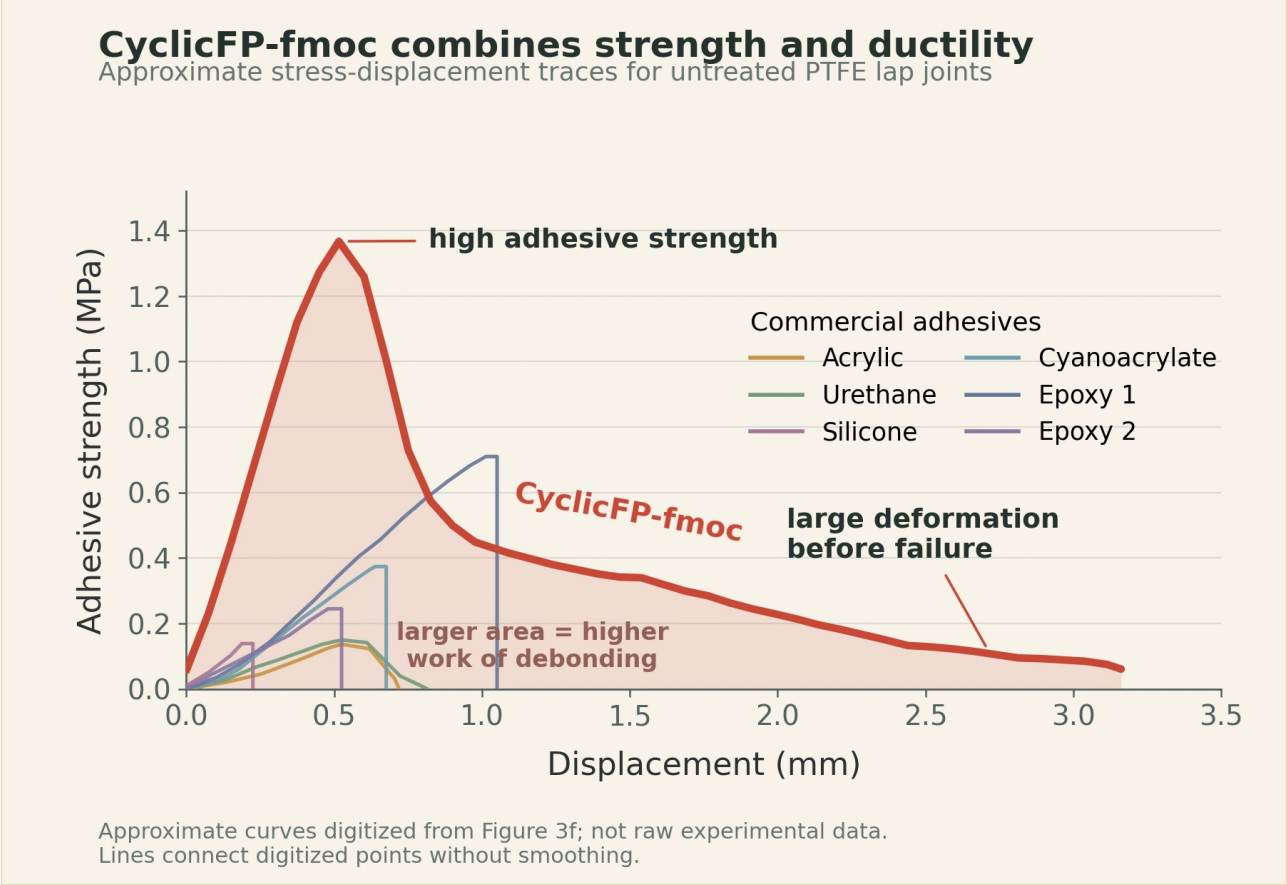
Varian terbaik malah bukan molekul utama. Molekul berkaitan dengan tiga gugus fmoc, **CyclicFP-fmoc3**, mencapai **2,3 ± 0,2 MPa** pada PTFE. Makalah tetap banyak berfokus pada CyclicFP-fmoc ker-

ana molekul inilah yang memberi gabungan lengkap antara kekuatan, kemuluran, bukti mekanistik, dan pelepasan dengan pembasuhan.

Kemuluran ialah separuh kedua dakwaan itu

Kekuatan sahaja tidak cukup. Pelekat rapuh dapat mencapai tegasan puncak tinggi lalu gagal mendadak. Dakwaan yang lebih khas dalam makalah adalah bahawa CyclicFP-fmoc juga bertingkah laku mulur.

Pada lengkung ricih tindih, CyclicFP-fmoc mencapai tegasan puncak lalu kehilangan tegasan secara berperingkat ketika sesaran terus berterusan. Pelekat komersial yang diuji dalam makalah bertingkah laku lebih seperti sambungan rapuh: kegagalan berlaku sejurus selepas tegasan puncaknya.



CyclicFP-fmoc menggabungkan puncak tegasan tinggi dengan ekor pascapuncak yang panjang; kawasan berarsir adalah panduan editorial terhadap kerja pelepasan ikatannya yang lebih besar. Lengkung anggaran didigitalkan dari Imej 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 lengkung tegasan-sesaran sebagai kerja pemisahan. CyclicFP-fmoc menghasilkan **1300 N/m** pada PTFE. Pelekat komersial yang diuji berada antara **26 hingga 314 N/m**.

Mode kegagalannya sesuai dengan tafsiran itu. Sambungan PTFE dengan CyclicFP-fmoc gagal secara kohesif, di dalam pelekat. Ini menunjukkan bahawa pelekat dapat membuang tenaga melalui deformasi dalaman, sementara antara muka PTFE lebih kuat daripada lapisan pelekat pukal dalam ujian tersebut.

Eksperimen relaksasi tegasan menambahkan skala masa molekul. Pada 20 C, masa relaksasi karakteristik adalah **60 ms**, dan analisis Arrhenius menghasilkan tenaga aktivasi **33,8 kJ/mol**. Secara ringkas, lapisan pelekat dapat menata ulang cukup cepat untuk melunakkan kepekatan tegasan mendadak, bukannya bertingkah laku sebagai pepejal rapuh yang statik.

Mengapa para penulis menganggap fluorin penting

PTFE tersusun dari ikatan karbon-fluorin. CyclicFP-fmoc membawa gugus crown ether berfluorin. Para penulis berpendapat bahawa **interaksi F-F** membantu pelekat melekat pada PTFE, sementara interaksi lain membantu lapisan pelekat tetap menyatu dan berdeformasi.

Beberapa eksperimen kawalan menunjuk ke arah tersebut. Ketika atom fluorin dalam CyclicFP-fmoc diganti dengan atom hidrogen, CyclicP-fmoc yang dihasilkan melekat 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 pengumpulan pi atau ikatan hidrogen juga berprestasi lebih buruk.

Makalah lalu menggunakan spektroskopi dan struktur kristal untuk menyokong gambaran interaksi tersebut. Dalam kristal CyclicFP-fmoc, atom fluorin pada molekul jiran berjarak **2,49 hingga 2,91 angstrom**, lebih pendek daripada jumlah van der Waals **2,94 angstrom** untuk dua atom fluorin. FT-IR dan NMR suhu-pemboleh ubah menyokong kehadiran ikatan hidrogen, interaksi F-F, dan pengumpulan pi-pi dalam pelekat amorf.

Yang paling langsung berkaitan PTFE, spektrum **19F MAS NMR** keadaan padat beralih ketika CyclicFP-fmoc dicampur dengan nanopartikel PTFE atau helaian nipis PTFE. Kawalan tanpa fluorin tidak menghasilkan anjakan yang sama. Ini merupakan bukti, bukan sekadar sketsa reka bentuk, bahawa bahagian berfluorin dari pelekat 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 antara muka membantu lekatan pada PTFE, manakala ikatan hidrogen dan pengumpulan pi-pi menyumbang terhadap kohesi serta kemuluran di dalam pelekat.

Penanggalan melalui pembasuhan memang nyata, tetapi skopnya terhad

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

demonstrasi mereka. Mereka juga memulihkan pelekat dan menggunakannya kembali berulang kali, mengekalkan kekuatan lekatan sekitar **1,2 ± 0,1 MPa** dalam ujian penggunaan kembali.

Ini penting kerana pelekat kuat konvensional sering sukar dihapuskan secara bersih. Gam yang dapat mengunci PTFE lalu dicuci ketika diperlukan akan berguna untuk perbaikan, pembongkaran, dan penggunaan ulang.

Tetapi batasannya penting. Makalah menguji sampel terkawal, bukan semua permukaan industri yang terkontaminasi, sambungan yang telah terpapar cuaca, paparan pelarut, atau keadaan penuaan jangka panjang. Pelepasan dengan etanol pada plat PTFE tidak sama dengan membuktikan proses kitar semula lengkap untuk rakitan yang diperbuat daripada banyak bahan.

Makalah juga menyatakan bahawa CyclicFP-fmoc bukan PFAS “forever chemical”. Pernyataan itu tidak boleh diperluas menjadi penilaian risiko persekitaran yang lengkap. Kekekalan, ketoksikan, skala pembuatan, laluan pelepasan, dan peraturan adalah persoalan yang berbeza.

Apa yang tidak dibuktikan kajian ini

- Kajian ini **tidak** menunjukkan produk pelekat yang siap dipasarkan.
- Kajian ini **tidak** membuktikan bahawa PTFE kini dapat dilekatkan secara boleh dipercayai di setiap persekitaran industri tanpa persiapan permukaan.
- Kajian ini **tidak** menunjukkan bahawa pelepasan dengan etanol berfungsi sama baiknya pada setiap substrat, keadaan permukaan, atau sambungan yang telah menua.
- Kajian ini **tidak** membuktikan bahawa interaksi F-F sahaja menerangkan lekatan. Mekanisme yang dicadangkan menggabungkan F-F, ikatan hidrogen, dan pengumpulan pi-pi.
- Kajian ini **tidak** menunjukkan alur kerja kitar semula plastik yang lengkap.
- Kajian ini **tidak** menetapkan profil keselamatan persekitaran atau toksikologi yang lengkap bagi molekul pelekat.
- Kajian ini **tidak** bermakna pelekat komersial secara umum lebih buruk. Perbandingan hanya berlaku pada bahan dan konfigurasi ricih tindih PTFE yang diuji dalam makalah ini.

Sejauh mana kukuhnya hasil?

Untuk makalah bahan makmal, hasilnya kukuh kerana para penulis tidak hanya melaporkan satu angka tinggi. Mereka menguji kekuatan, kemuluran, ketahanan selama 30 hari, toleransi terhadap air, pelekatan semula berulang, pelepasan dengan etanol, varian molekul, dan bukti spektroskopi bagi interaksi yang dicadangkan.

Gabungan paling meyakinkan adalah mode kegagalan ditambah eksperimen kawalan. Jika antara muka PTFE gagal terlebih dahulu, dakwaannya akan lebih lemah. Sebaliknya, sambungan gagal di dalam lapisan pelekat. Dan ketika struktur siklik berfluorin dihapuskan atau diubah, lekatan pada PTFE turun tajam.

Persoalan yang berbaki adalah skala dan kes penggunaan. Ujian ricih tindih piawai dan berguna, tetapi sambungan sebenar mengalami pengelupasan, hentaman, keletihan, pencemaran, kitaran suhu, dan bahan campuran. Molekul yang berfungsi sangat baik di antara plat makmal terkawal masih perlu menjadi formulasi, proses, dan data ketahanan sebelum menjadi pelekat kejuruteraan.

Mengapa ini penting

PTFE berada pada had bahan yang serba sukar. Sifat inertnya adalah fitur yang membuatnya berharga, dan fitur yang sama membuatnya sukar diintegrasikan ke dalam rakitan yang mudah diperbaiki atau dikitar semula.

Makalah ini menawarkan pendekatan yang khusus secara kimia, bukan bergantung pada kekerasan proses. Bukannya mengasarkan atau menyerang permukaan PTFE secara kimia, mereka merancang molekul kecil yang dapat berinteraksi dengan permukaan tersebut sambil mengekalkan lapisan pelekat yang mulur dan reversibel.

Jika logik reka bentuk ini dapat digeneralisasikan, ia dapat membantu membina pelekat yang lebih mudah dilepas dan digunakan semula tanpa kehilangan keseluruhan prestasi mekanikalnya. Itulah janji sebenarnya: bukan satu molekul sebagai gam jadi, melainkan strategi molekul untuk lekatan yang kuat dan mulur, dan dapat dilepaskan.

Ringkasan utama

Kikkawa, Goswami, dan rakan-rakannya melaporkan molekul kecil fosfat eter mahkota berfluorin sebagai pelekat untuk PTFE dan substrat lain. Molekul utama, CyclicFP-fmoc, melekatkan plat PTFE tanpa rawatan dengan kekuatan 1,3 ± 0,1 MPa dalam ujian ricih tindih, gagal secara kohesif bukannya pada antara muka PTFE, menunjukkan kerja pemisahan 1300 N/m, mengekalkan prestasi selepas penyimpanan dan pelekatan semula berulang, serta dapat ditanggalkan daripada plat PTFE dengan pembasuhan etanol. Varian berkaitan mencapai 2,3 ± 0,2 MPa. Spektroskopi dan molekul kawalan menyokong mekanisme di mana interaksi F-F membantu antara muka PTFE, manakala ikatan hidrogen dan pengumpulan pi-pi membantu lapisan pelekat membuang tegasan. Hasil ini merupakan demonstrasi makmal yang menjanjikan tentang lekatan kuat, mulur, dan boleh dibasuh dari PTFE, tetapi belum merupakan gam komersial, penyelesaian kitar semula universal, atau penilaian keselamatan persekitaran 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