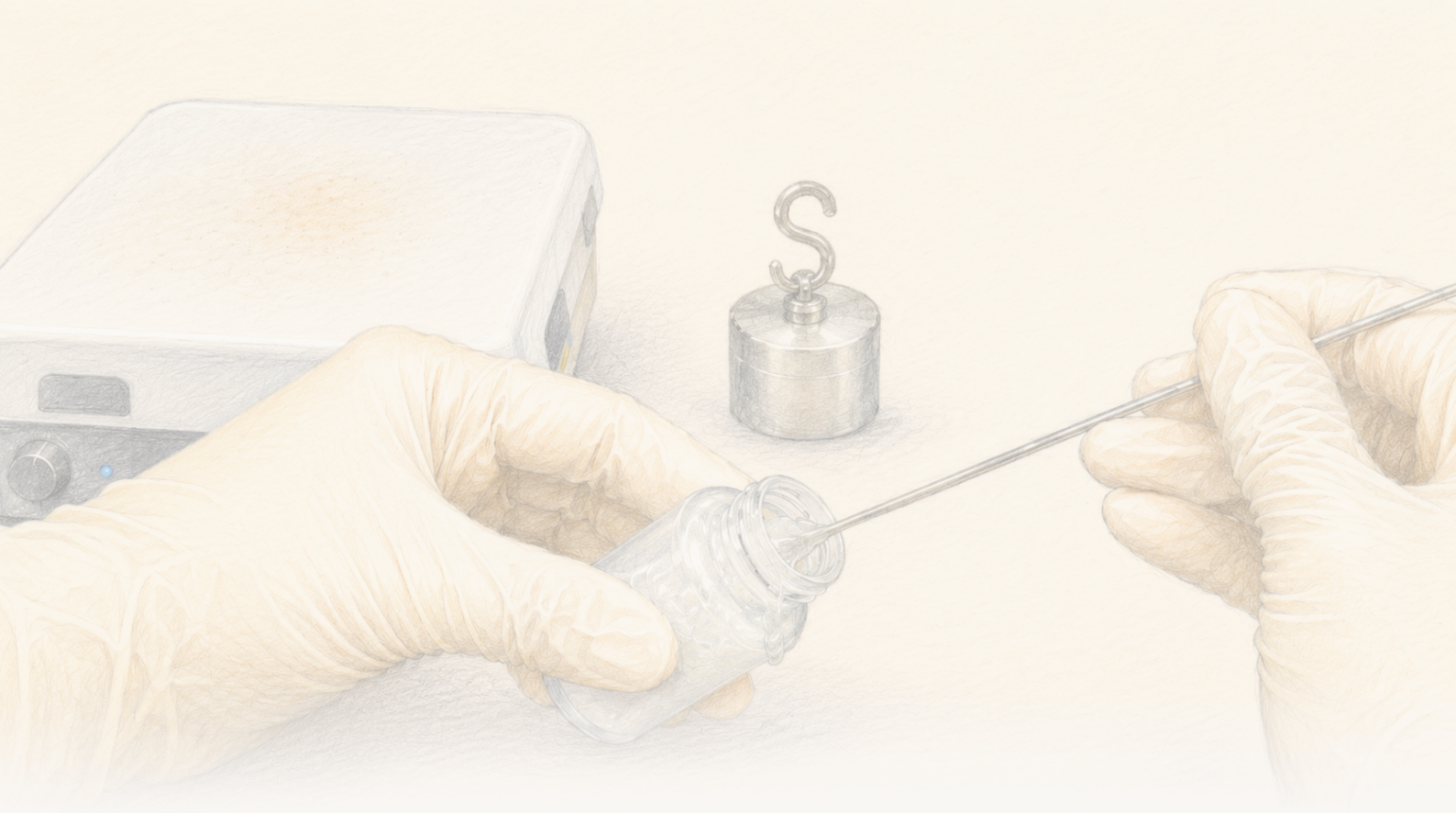


The Clean Paper

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

# Një molekulë e vogël ngjiti PTFE të patrajtuar, pastaj u la me etanol

*Një punim në JACS raporton ngjitës fluoro-crown ether phosphate që lidhin PTFE famëkeq për inertësinë e tij në teste laboratorike lap-shear, ndërsa mbeten të heqshëm me larje me etanol. CyclicFP-fmoc arriti 1.3 MPa në PTFE të patrajtuar me dështim koheziv duktil, ndërsa një variant i afërt arriti 2.3 MPa. Mekanizmi mbështetet nga prova spektroskopike për ndërveprime fluor–fluor në PTFE, plus lidhje hidrogjeni dhe grumbullim π brenda ngjitësit. Është një rezultat premtues materialesh, jo ende ngjitës komercial, zgjidhje universale riciklimi ose vlerësim i plotë i sigurisë mjedisore.*

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 është i vështirë për t'u ngjitur për një arsye

Politetrafluoroetileni, më i njohur si PTFE dhe i shitur me emra tregtarë përfshirë Teflon, është i dobishëm pjesërisht sepse nuk dëshiron të ndërveprojë. Energjia e sipërfaqes së tij është e ulët. Shumë lëngje formojnë pika mbi të. Shumë ngjitës dështojnë mbi të nëse sipërfaqja nuk gërryhet, ashpërsohet, trajtohet me plazmë ose shoqërohet me një primer të specializuar.

Kjo rezistencë është e shkëlqyer për veshje jongjitëse dhe pjesë kimikisht inerte. Është problem kur inxhinierët duan ta bashkojnë PTFE me një pjesë tjetër pa dëmtuar përgjithmonë sipërfaqen.

Një punim në Journal of the American Chemical Society raporton një ngjitës me molekula të vogla që e sulmon këtë problem nga një drejtim i pazakontë. Kohei Kikkawa, Abir Goswami dhe kolegët përshkruajnë molekula fosfati fluoro-crown ether që mund të ngjiten fort me PTFE të patrajtuar, të deformohen në mënyrë duktile para dështimit dhe më pas të hiqen nga pllakat PTFE duke u larë me etanol.

Molekula kryesore quhet **CyclicFP-fmoc**. Në testet lap-shear, ajo mbajti pllaka PTFE të patrajtuara me forcë ngjitjeje **1.3 ± 0.1 MPa** dhe punë shkëputjeje **1300 N/m**. Meqë 1 MPa është 1 njuton për milimetër katror, tensioni maksimal i matur prej 1.3 MPa është i njëjti presion si afërsisht pesha e një molle 130-gramëshe që vepron mbi çdo milimetër katror. Kjo është një analogji për njësi sipërfaqeje, jo forca ose gjeometria e kontaktit të kampionit të testit. Puna e raportuar e shkëputjes, 1300 N/m, është e barasvlershme me 1300 xhaul energji ndarjeje për metër katror. Për një demonstrim vizual të drejtpërdrejtë, jo si vlerësim inxhinierik ngarkese, punimi tregon një lidhje prej 7 $cm^2$ që mban një peshë 8 kg. Lidhja dështoi brenda shtresës së ngjitësit, jo në ndërfaqen me PTFE. Kjo ka rëndësi: do të thotë se ndërfaqja nuk ishte pika e dobët e testit.

Ilustrim me laps i bazuar në fotografinë e punimit të shiritit ngjitës që mban pesha të varura (Figura 2, majtas). Nuk është fotografia origjinale, vizatim në shkallë ose diagram i vlerësimit inxhinierik të ngarkesës.

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

Rezultati nuk është “problemi i PTFE u zgjidh”. Është një rezultat i kontrolluar laboratorik i materialeve. Por është një shembull i pastër i një kombinimi të vështirë: ngjitje e fortë, dështim duktil dhe heqje me larje nga një sipërfaqe e famshme për rezistencën ndaj ngjitjes.

## Pse forca e zakonshme dhe heqja e lehtë luftojnë me njëra-tjetrën

Ngjitësit zakonisht bëjnë një kompromis. Ngjitësit polimerikë rigidë e të ndërlidhur mund të jenë të fortë, por shpesh dështojnë papritur dhe hiqen me vështirësi pa lënë gjurmë. Ngjitësit më të butë, të ngjashëm me shiritin ngjitës, mund të shtrihen dhe të shpërndajnë energji, por zakonisht humbin forcë.

Kompromisi është molekular. Forca kërkon transferim efikas të stresit. Duktiliteti kërkon lëvizje, riorganizim dhe shpërndarje energjie. Heqja e lehtë kërkon lidhje që mund të prishen pa dëmtuar

substratin. Këto kërkesa tërheqin në drejtime të ndryshme.

Ngjitësit me molekula të vogla janë tërheqës sepse, në parim, mund të jenë të heqshëm dhe të ricikluesshëm. Ata nuk formojnë rrjetet e gjata polimerike të ndërthurura që i bëjnë shumë ngjitës konvencionalë rezistentë. Kjo është edhe dobësia e tyre: pa ndërthurje, molekulat e vogla normalisht e kanë të vështirë të japin ngjitje duktile dhe me forcë të lartë.

Punimi në JACS përpiqet ta zëvendësojë ndërthurjen polimerike me një grup ndërveprimesh jokovalente të kthyeshme. Molekula kombinon një rajon të fluorizuar crown-ether phosphate me një grup fmoc të lidhur përmes urethanit. Me fjalë të thjeshta, unaza e fluorizuar mund të ndërveprojë me sipërfaqen e pasur me fluor të PTFE, grupet urethan mund të formojnë lidhje hidrogjeni me molekulat fqinje të ngjitësit dhe grupet e sheshta fluorenil mund të grumbullohen mbi njëra-tjetrën. Objektivi i dizajnit nuk është një lidhje magjike. Është një grup ndërveprimesh të dobëta dhe të kthyeshme që mund të bashkëpunojnë:

- ndërveprime fluor–fluor pranë PTFE;
- lidhje hidrogjeni midis molekulave të ngjitësit;
- grumbullim $\pi$–$\pi$ mes grupeve fluorenil;
- dhe mjaftueshëm lëvizshmëri molekulare për të relaksuar stresin në vend që të çahet menjëherë.

# Çfarë tregoi testi kryesor me PTFE

Autorët vendosën CyclicFP-fmoc midis pllakave PTFE që nuk ishin trajtuar ose pastruar në sipërfaqe, e ngrohën ngjitësin dhe i lanë pllakat në temperaturë ambienti për 10 minuta përpara testimit.

Për testimin sasior përdorën lap shear. Pllakat PTFE të lidhura me CyclicFP-fmoc arritën **1.3 ± 0.1 MPa** tension tërheqës, të raportuar si mesatare ± devijim standard për tri matje. Aplikimi i ngjitësit rreth **50 C** me tharëse flokësh dha një vlerë të ngjashme, **1.1 ± 0.1 MPa**, pra nuk kërkonte vetëm shkrirje në temperaturë të lartë.

Autorët i krahasuan këto vlera me ngjitës komercialë epoksi, akrilikë, silikoni dhe urethani në të njëjtin konfigurim lap-shear me PTFE. Këto kontrolle arritën rreth **0.1 deri në 0.7 MPa**, krahasuar me **1.3 ± 0.1 MPa** për CyclicFP-fmoc. Ky krahasim me të njëjtin substrat dhe të njëjtën metodë është më informues sesa vendosja e vlerave MPa nga materiale dhe gjeometri testimi të ndryshme në një renditje të vetme.

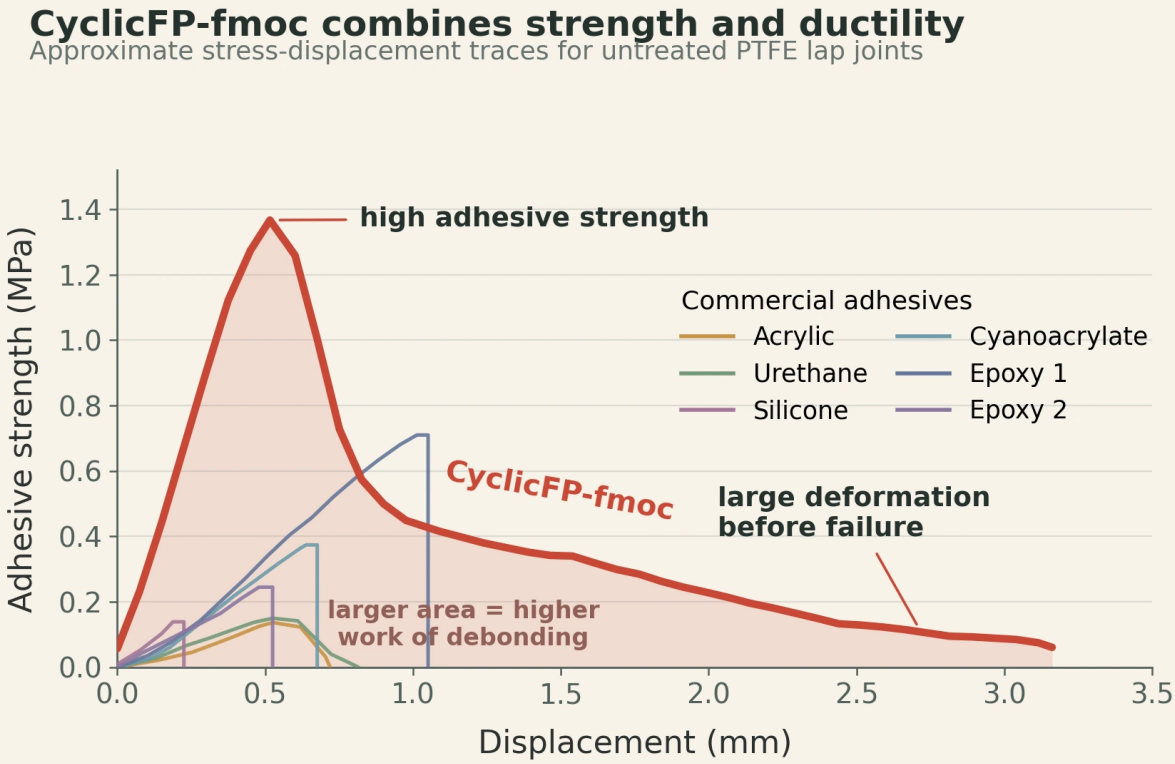
Numri mbeti i ngjashëm pas ruajtjes. Pas 30 ditësh në kushte ambienti, forca ngjitëse ishte **1.3 ± 0.2 MPa**. Pasi pllakat u ndanë me forcë, u mbivendosën sërish dhe u ringrohën, forca ishte **1.2 ± 0.2 MPa**. Përsëritja e këtij cikli dhjetë herë dha ende rreth **1.3 ± 0.3 MPa**.

Varianti më i mirë nuk ishte molekula kryesore. Një molekulë e afërt me tri grupe fmoc, **CyclicFP-fmoc3**, arriti **2.3 ± 0.2 MPa** në PTFE. Punimi megjithatë përqendrohet shumë te CyclicFP-fmoc sepse jep kombinimin e plotë të forcës, duktilitetit, provave mekanistike dhe heqjes me larje.

# Duktiliteti është gjysma e dytë e pretendimit

Vetëm forca nuk do të mjaftonte. Një ngjitës i brishtë mund të arrijë stres maksimal të lartë dhe më pas të dështojë papritur. Pretendimi më dallues i punimit është se CyclicFP-fmoc sillet gjithashtu në mënyrë duktile.

Në kurbat lap-shear, CyclicFP-fmoc arriti stresin maksimal dhe më pas e humbi gradualisht stresin ndërsa zhvendosja vazhdonte. Ngjitësit komercialë të testuar në punim u sollën më shumë si lidhje të brishta: dështimi erdhi shpejt pas stresit maksimal.




CyclicFP-fmoc kombinon një kulm të lartë stresi me një bisht të gjatë pas kulmit; zona e hijezuar është një udhëzues editorial për punën më të madhe të shkëputjes. Kurba të përafërta të dixhitalizuara nga Figura 3f; jo të dhëna eksperimentale të papërpunuara.

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

Autorët e sasiuan sipërfaqen nën këtë kurbë stres–zhvendosje si punë shkëputjeje. CyclicFP-fmoc dha **1300 N/m** në PTFE. Ngjitësit komercialë të testuar varionin nga **26 deri në 314 N/m**.

Mënyra e dështimit përputhet me këtë interpretim. Lidhjet PTFE me CyclicFP-fmoc dështuan në mënyrë kohezive, brenda ngjitësit. Kjo nënkupton se ngjitësi mund të shpërndante energji duke u deformuar nga brenda, ndërsa ndërfaqja me PTFE mbeti më e fortë se masa e shtresës së ngjitësit në këto teste.

Eksperimentet e relaksimit të stresit shtojnë shkallën kohore molekulare. Në 20 C, koha karakteristike e relaksimit ishte **60 ms**, dhe analiza Arrhenius dha energji aktivizimi **33.8 kJ/mol**. Me fjalë të thjeshta, shtresa ngjitëse mund të riorganizohet mjaft shpejt për ta zbutur një përqendrim të papritur stresi në vend që të sillet si një trup statik i brishtë.

# Pse autorët mendojnë se fluori ka rëndësi

PTFE ndërtohet nga lidhje karbon–fluor. CyclicFP-fmoc mban grupe crown-ether të fluorizuara. Autorët argumentojnë se **ndërveprimet F–F** ndihmojnë ngjitësin të lidhet me PTFE, ndërsa ndërveprime të tjera ndihmojnë shtresën e ngjitësit të qëndrojë bashkë dhe të deformohet.

Disa eksperimente kontrolli tregojnë në këtë drejtim. Kur atomet e fluorit në CyclicFP-fmoc u zëvendësuan me atome hidrogjeni, CyclicP-fmoc që rezultoi u lidh shumë më dobët me PTFE, rreth **0.1 ± 0.0 MPa**. Një fluoro-ether phosphate linear, AcyclicFP-fmoc, arriti vetëm **0.3 ± 0.1 MPa**. Varianteve pa njësi për grumbullim $\pi$ ose lidhje hidrogjeni gjithashtu u shkoi më keq.

Më pas punimi përdor spektroskopinë dhe strukturën kristalore për të mbështetur figurën e ndërveprimeve. Në një kristal CyclicFP-fmoc, atomet e fluorit në molekulat fqinje ndodhen **2.49 deri në 2.91 ångström** larg, më pak se shuma van der Waals **2.94 ångström** për dy atome fluori. FT-IR dhe NMR me temperaturë të ndryshueshme mbështesin lidhjet e hidrogjenit, ndërveprimet F–F dhe grumbullimin $\pi$–$\pi$ në ngjitësin amorf.

Më drejtpërdrejt për PTFE, spektrat solid-state **19F MAS NMR** zhvendosen kur CyclicFP-fmoc përzihet me nanogrimca PTFE ose fletë të holla PTFE. Kontrolli i pafluorizuar nuk prodhon të njëjtën zhvendosje. Kjo është provë, jo vetëm skicë dizajni, se pjesët e fluorizuara të ngjitësit ndërveprojnë me PTFE.

Megjithatë kjo nuk duhet thjeshtuar në “lidhjet F–F e zgjidhin PTFE”. Vetë modeli i punimit ka më shumë shtresa: ndërveprimet F–F në ndërfaqe ndihmojnë ngjitjen me PTFE, ndërsa lidhjet e hidrogjenit dhe grumbullimi $\pi$–$\pi$ kontribuojnë në kohezion dhe duktilitet brenda ngjitësit.

# Heqja me larje është reale, por e kufizuar

Rezultati i heqjes është pika praktike më tërheqëse. Autorët i lanë pllakat PTFE të ndara me etanol dhe raportojnë heqje të plotë të CyclicFP-fmoc pa mbetje në demonstrimin e tyre. Ata gjithashtu rikuperuan ngjitësin dhe e ripërdorën në mënyrë të përsëritur, duke ruajtur rreth **1.2 ± 0.1 MPa** forcë ngjitëse në testet e ripërdorimit.

Kjo ka rëndësi sepse ngjitësit e fortë konvencionalë shpesh hiqen me vështirësi pa lënë gjurmë. Një ngjitës që mund ta mbajë PTFE dhe më pas të lahet do të ishte i dobishëm për riparim, çmontim dhe ripërdorim.

Por kufiri ka rëndësi. Punimi teston kampione të kontrolluara, jo çdo sipërfaqe industriale të kon-

taminuar, lidhje të plakur nga moti, ekspozim ndaj tretësve ose kusht afatgjatë plakjeje. Heqja me etanol nga pllakat PTFE nuk është e njëjta gjë me provimin e një procesi të plotë riciklimi për montime të bëra nga shumë materiale.

Punimi thotë gjithashtu se CyclicFP-fmoc nuk është një "kimikat i përhershëm" PFAS. Ky pohim nuk duhet zgjeruar në një vlerësim të plotë të rrezikut mjedisor. Qëndrueshmëria në mjedis, toksiciteti, shkalla e prodhimit, rrugët e çlirimit dhe rregullimi janë pyetje të veçanta.

## Çfarë nuk provon kjo

- **Nuk** tregon një produkt ngjitës gati për treg.
- **Nuk** provon se PTFE tani mund të ngjitet me besueshmëri në çdo mjedis industrial pa përgatitje të sipërfaqes.
- **Nuk** tregon se heqja me etanol funksionon po aq mirë në çdo substrat, gjendje sipërfaqeje ose lidhje të plakur.
- **Nuk** provon se vetëm ndërveprimet F–F e shpjegojnë ngjitjen. Mekanizmi i punimit kombinon F–F, lidhje hidrogjeni dhe grumbullim $\pi$–$\pi$.
- **Nuk** tregon një rrjedhë të plotë pune për riciklimin e plastikës.
- **Nuk** vendos një profil të plotë sigurie mjedisore ose toksikologjike për molekulat ngjitëse.
- **Nuk** do të thotë se ngjitësit komercialë janë përgjithësisht më të dobët. Krahasimet janë specifike për materialet dhe konfigurimin lap-shear me PTFE të testuar në këtë punim.

## Sa i fortë është rezultati?

Për një punim laboratorik materialesh, rezultati është i fortë sepse autorët bëjnë më shumë sesa raportojnë një numër të vetëm të lartë. Ata testojnë forcën, duktilitetin, qëndrueshmërinë gjatë 30 ditëve, tolerancën ndaj ujit, ringjitjen e përsëritur, heqjen me etanol, variante molekulare dhe prova spektroskopike për ndërveprimet e propozuara.

Kombinimi më bindës është mënyra e dështimit plus kontrollet. Nëse ndërfaqja PTFE do të dështonte e para, pretendimi do të ishte më i dobët. Në vend të kësaj, lidhja dështoi brenda shtresës së ngjitësit. Dhe kur struktura ciklike e fluorizuar hiqet ose ndryshohet, ngjitja me PTFE bie fort.

Pyetjet që mbeten janë shkalla dhe rasti i përdorimit. Testet lap-shear janë të standardizuara dhe të dobishme, por lidhjet reale përballen me zhveshje, goditje, lodhje, ndotje, cikle temperature dhe materiale të përziera. Një molekulë që funksionon shkëlqyeshëm mes pllakave të kontrolluara laboratorike duhet ende të bëhet formulim, proces dhe grup të dhënash qëndrueshmërie përpara se të bëhet ngjitës inxhinierik.

# Pse ka rëndësi

PTFE ndodhet në një kufi të sikletshëm materialesh. Inertësia e tij është tipari që e bën të vlefshëm dhe i njëjti tipar e bën të vështirë integrimin në montime të riparueshme ose të ricikluesshme.

Ky punim ofron një rrugë kimikisht specifike në vend të forcës së verbër. Në vend që të ashpërsojë ose sulmojë kimikisht sipërfaqen PTFE, projekton një molekulë të vogël që mund të ndërveprojë me atë sipërfaqe ndërsa mban një shtresë ngjitëse duktile e të kthyeshme.

Nëse kjo logjikë dizajni përgjithësohet, mund të ndihmojë në ndërtimin e ngjitësve më të lehtë për t'u hequr dhe ripërdorur pa hequr dorë nga gjithë performanca mekanike. Ky është premtimi real: jo një molekulë si ngjitës i përfunduar, por një strategji molekulare për ngjitje të fortë, duktile dhe të shkëputshme.

# Përmbledhje e shkurtër

Kikkawa, Goswami dhe kolegët raportojnë molekula të vogla fluoro-crown ether phosphate si ngjitës për PTFE dhe substrate të tjera. Molekula kryesore, CyclicFP-fmoc, lidhi pllaka PTFE të patrajtuara me $1.3 \pm 0.1$ MPa në teste lap-shear, dështoi në mënyrë kohezive dhe jo në ndërfaqen PTFE, tregoi punë shkëputjeje 1300 N/m, ruajti performancën pas ruajtjes dhe ringjitjes së përsëritur dhe mund të hiqej nga pllakat PTFE me larje me etanol. Një variant i afërt arriti $2.3 \pm 0.2$ MPa. Spektroskopia dhe molekulat e kontrollit mbështesin një mekanizëm ku ndërveprimet F–F ndihmojnë ndërfaqen PTFE, ndërsa lidhjet e hidrogjenit dhe grumbullimi $\pi$–$\pi$ e ndihmojnë shtresën ngjitëse të shpërndajë stresin. Rezultati është një demonstrim laboratorik premtues i ngjitjes së fortë, duktile dhe të heqshme me larje në PTFE, jo ende një ngjitës komercial, zgjidhje universale riciklimi ose vlerësim i plotë i sigurisë mjedisore.

## Burimet

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