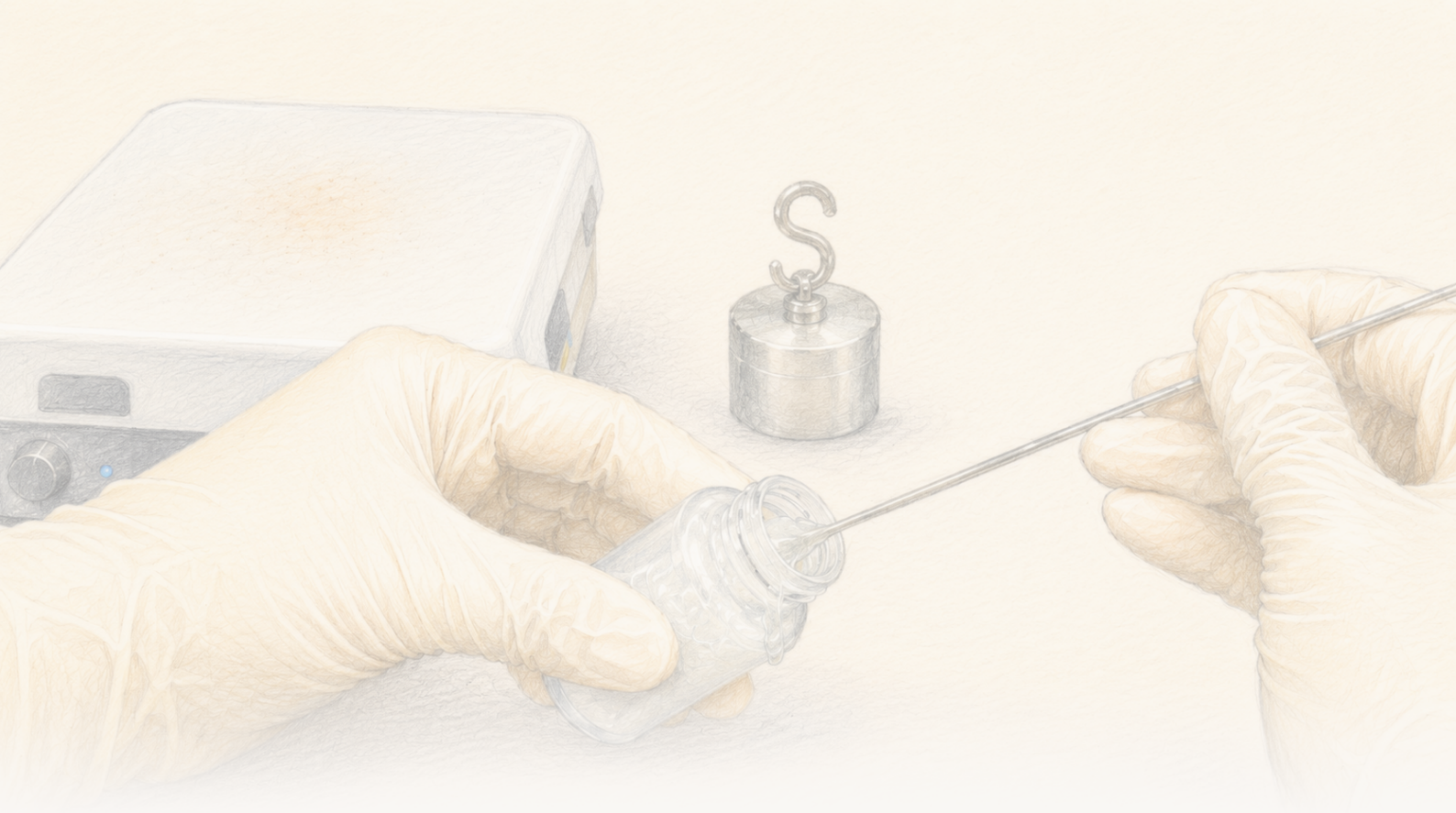


The Clean Paper

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

একটি ছোট অণু untreated PTFE-কে জুড়ছে, আবার ethanol দিয়ে ধুয়ে সরানোও গছে

JACS-এর একটি গবষেণাপত্র fluoro-crown ether phosphate আঠা-এর কথা জানায়, যা পরীক্ষাগাররে lap-shear পরীক্ষা-এ adhesion-প্রতরিোধী PTFE-কে জোড়ে এবং পরে ethanol দিয়ে ধুয়ে সরানো যায়। CyclicFP-fmoc untreated PTFE-তে নমনীয় cohesive ব্যর্থতা-সহ 1.3 MPa-তে পৌঁছায়, আর সম্পর্কতি একটি variant 2.3 MPa পর্যন্ত যায়। PTFE-তে fluorine-fluorine interaction এবং আঠার ভতেরে hydrogen bonding ও pi-stacking-এর পক্ষে spectroscopy-ভত্তিকি প্রমাণ আছে। এটি আশাব্যঞ্জক পদার্থ ফল; এখনও বাণজি্যকি আঠা, সর্বজনীন পুনর্ব্যবহার সমাধান বা পূর্ণ পরবিশেগত নরিাপত্তা মূল্যায়ন নয়।

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-তে কিছু আটকানো কঠিন হওয়ার কারণ আছে

Polytetrafluoroethylene, যা PTFE নামে বেশি পরিচিত এবং Teflon-সহ বিভিন্ন বাণিজ্যিক নামে বিক্রি হয়, আংশিকভাবে এত উপকারী কারণ এটি অন্য কিছুর সঙ্গে সহজে মিথস্ক্রিয়া করতে চায় না। এর পৃষ্ঠশক্তি কম। অনেকে তরল এর ওপর ফোঁটা হয়ে থাকে। পৃষ্ঠকে etch, খসখসে, প্লাজমা-ধরে নেওয়া বা বিশেষ primer ব্যবহার না করলে অনেক আঠাই এতে কাজ করে না।

ননস্টিক আবরণ ও রাসায়নিকভাবে নিষ্ক্রিয় যন্ত্রাংশের জন্য এই প্রতিরোধ ক্ষমতা দারুণ। কিন্তু প্রকৌশলীরা যখন পৃষ্ঠকে স্থায়ীভাবে ক্ষতিগ্রস্ত না করে PTFE-কে আরেকটি অংশের সঙ্গে জোড়া দিতে চান, তখন এটিই সমস্যা হয়ে দাঁড়ায়।

Journal of the American Chemical Society-তে প্রকাশিত একটি গবেষণাপত্র সমস্যাটিকে অস্বাভাবিক দিক থেকে মোকাবিলা করা ছোট অণুর একটি adhesive-এর কথা জানায়। Kohei Kikkawa, Abir Goswami ও সহকর্মীরা fluoro-crown-ether phosphate অণু তৈরি করেছেন, যা কোনো আগাম surface treatment ছাড়াই PTFE-তে শক্তভাবে আটকে থাকতে পারে, ভাঙার আগে নমনীয়ভাবে বিকৃত হয়, এবং পরে ethanol দিয়ে ধুয়ে PTFE sheet থেকে সরানো যায়।

প্রধান অণুটির নাম **CyclicFP-fmoc**। ল্যাপ-শিয়ার পরীক্ষায় এটি অপরিশোধিত PTFE পাতকে **1.3 ± 0.1 MPa** আঠালো শক্তিতে ধরে রেখেছিল এবং বিচ্ছিন্ন করতে কাজ লেগেছিল **1300 N/m**। 1 MPa মানে প্রতি বর্গমিলিমিটারে 1 নিউটন; তাই 1.3 MPa সর্বোচ্চ চাপকে আনুমানিকভাবে এমন বলা যায় যেন প্রতি বর্গমিলিমিটারে 130-গ্রাম আপেলের ওজন পড়ছে। এটি কেবল একক ক্ষেত্রফলভিত্তিক তুলনা, পরীক্ষার নমুনার প্রকৃত বল বা সংযোগের জ্যামিতি নয়। 1300 N/m বিচ্ছিন্নকরণ-কাজ প্রতি বর্গমিটারে 1300 joules বিচ্ছেদশক্তির সমান। প্রকৌশলগত ভার rating হিসেবে নয়, সরাসরি দৃশ্যমান প্রদর্শন হিসেবে গবেষণাপত্রে $7\,\mathrm{cm}^2$ জোড়কে 8 kg ওজন ধরে রাখতে দেখানো হয়েছে। জোড়টি PTFE-র সংযোগস্থলে নয়, আঠার স্তরের ভেতরে ভেঙেছে। এটি গুরুত্বপূর্ণ: পরীক্ষায় দুর্বল বিন্দু ছিল না PTFE-আঠা সংযোগস্থল।

ঝুলন্ত ওজন ধরে রাখা আঠালো স্ট্রিপির গবেষণাপত্ররে ছবরি (চত্রি 2, বাম) ভত্তিতিে পন্সেলি অঙ্কন। এটি মূল আলোকচত্রি নয়, স্কলে-অনুযায়ী অঙ্কনও নয়, এবং প্রকৌশলগত ভার-rating চত্রি-ও নয়।

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

ফলটরি অর্থ “PTFE সমস্যার সমাধান হয়ে গছে” নয়। এটি নয়িন্ত্রতি পরীক্ষাগাররে একটি উপাদান ফল। তবে কঠনি একটি সমন্বয়রে পরষ্কিার উদাহরণ: শক্ত আসঞ্জন, নমনীয় ব্যর্থতা এবং আসঞ্জন প্রতরিোধরে জন্য পরচিতি একটি পৃষ্ঠ থকেে মুছে ফলেে সরয়িে নওেয়া।

সাধারণত শক্তি আর সহজে সরানো কনে পরস্পররে বরিুদ্ধে যায়

আঠাকে সাধারণত একটি আপস করতে হয়। শক্ত আন্তঃ-সম্পর্কতি পলমিার আঠা খুব শক্তশিালী হতে পারে, কন্তিু এগুলো প্রায়ই হঠাৎ ভঙেে যায় এবং পরষ্কিারভাবে সরানো কঠনি। নরম tape-এর মতো আঠা প্রসারতি হয়ে শক্তি শোষণ করতে পারে, কন্তিু সাধারণত শক্ততিে পছিয়িে থাকে।

এই আপসরে মূল কারণ অণুস্তরে। শক্তরি জন্য দরকার চাপ দক্ষভাবে এক অংশ থকেে আরকে অংশে পৌঁছানো। নমনীয়তার জন্য দরকার চলাচল, পুনর্বন্যিাস এবং শক্তি অপচয়। সহজে সরাতে চাইলে এমন বন্ধন দরকার যা ভত্তি-পদার্থ নষ্ট না করে ভাঙা যায়। এই চাহদিাগুলো ভন্নি দকিে টানে।

ছোট-অণুর আঠা আকর্ষণীয়, কারণ নীতগিতভাবে এগুলো সরানো ও পুনর্ব্যবহার করা যতেে পারে। বহু প্রচলতি আঠাকে tough করে এমন দীর্ঘ, জট-পাকানো পলমিার নটেওয়ার্ক এগুলো তরৈি করে না। এটইি আবার দুর্বলতা: সইে জট না থাকলে ছোট অণু সাধারণত নমনীয় অথচ উচ্চ-শক্তরি আসঞ্জন দতিে হমিশমি খায়।

JACS গবেষণাপত্রটি polymer-এর নজিস্ব জড়তার ওপর ভরসা না করে একাধকি **প্রত্যাবর্তনযোগ্য noncovalent interaction** একসঙ্গে কাজে লাগানোর চষ্টো করছে। অণুটতিে একটি fluorinated crown-ether phosphate অংশকে urethane-সম্পর্কতি Fmoc অংশরে সঙ্গে যুক্ত করা হয়ছে। সহজ করে বললে, fluorinated ring PTFE-র fluorine-সমৃদ্ধ পৃষ্ঠরে সঙ্গে মথিস্ক্রয়িা করতে পারে, urethane অংশ পাশরে adhesive molecule-এর সঙ্গে hydrogen bond করতে পারে, আর সমতল fluorenyl অংশগুলো একে অন্যরে ওপর স্তূপ হতে পারে। লক্ষ্য কোনো একক “জাদুকরি” bond নয়; বরং কয়কে ধরনরে দুর্বল ও প্রত্যাবর্তনযোগ্য মথিস্ক্রয়িাকে একসঙ্গে কাজ করানো:

- PTFE-র কাছে ফলোরনি-ফলোরনি মথিস্ক্রয়িা;
- আঠার অণুগুলোর মধ্যে হাইড্রোজনে বন্ধন;
- fluorenyl দলরে মধ্যে pi-pi স্তরবন্যিাস;
- এবং সঙ্গে এতটা আণবকি চলাচল, যাতে চাপ পড়লে সঙ্গে সঙ্গে ফটেে না গয়িে তা শথিলি হতে পারে।

প্রধান PTFE পরীক্ষায় কী দখো গছে

লখেকরো CyclicFP-fmoc এমন PTFE পাতরে মাঝখানে রখেছেলিনে যগেুলোকে আগে পৃষ্ঠ-ধরে নওেয়া বা পরষ্কিার করা হয়নি, আঠা গরম করছেলিনে এবং পরীক্ষার আগে পাতগুলো ঘররে তাপমাত্রায় 10 মনিটি রখেছেলিনে।

পরমিাণগত পরীক্ষায় তারা lap shear ব্যবহার করনে। CyclicFP-fmoc দয়িে জোড়া PTFE পাত tensile চাপে **1.3 ± 0.1 MPa** পর্যন্ত পৌঁছায়; তনিটি পরমিাপরে গড় ± মানক বচ্যিুতি হসিবেে এই মান দওেয়া হয়ছে। hair dryer দয়িে প্রায় **50 C**-এ আঠা লাগালওে কাছাকাছি মান, **1.1 ± 0.1 MPa**, পাওয়া যায়—অর্থাৎ শুধু উচ্চ তাপমাত্রায় গলানোই একমাত্র উপায় ছলি না।

একই PTFE lap-shear বন্যিাসে লখেকরো বাণজ্যিকি epoxy, acrylic, silicone ও urethane adhesive-এর সঙ্গে ফলটি তুলনা করনে।

ওই নিয়ন্ত্রণগুলোর শক্তি ছিল প্রায় **0.1 থেকে 0.7 MPa**, যেখানে CyclicFP-fmoc-এর ছিল **1.3 ± 0.1 MPa**। একই substrate ও একই পরীক্ষা-পদ্ধতিতে করা এই তুলনা, ভিন্ন পদার্থ ও ভিন্ন জ্যামিতির পরীক্ষার MPa মান এক তালিকায় সাজানোর চেয়ে অনেক বেশি তথ্যবহুল।

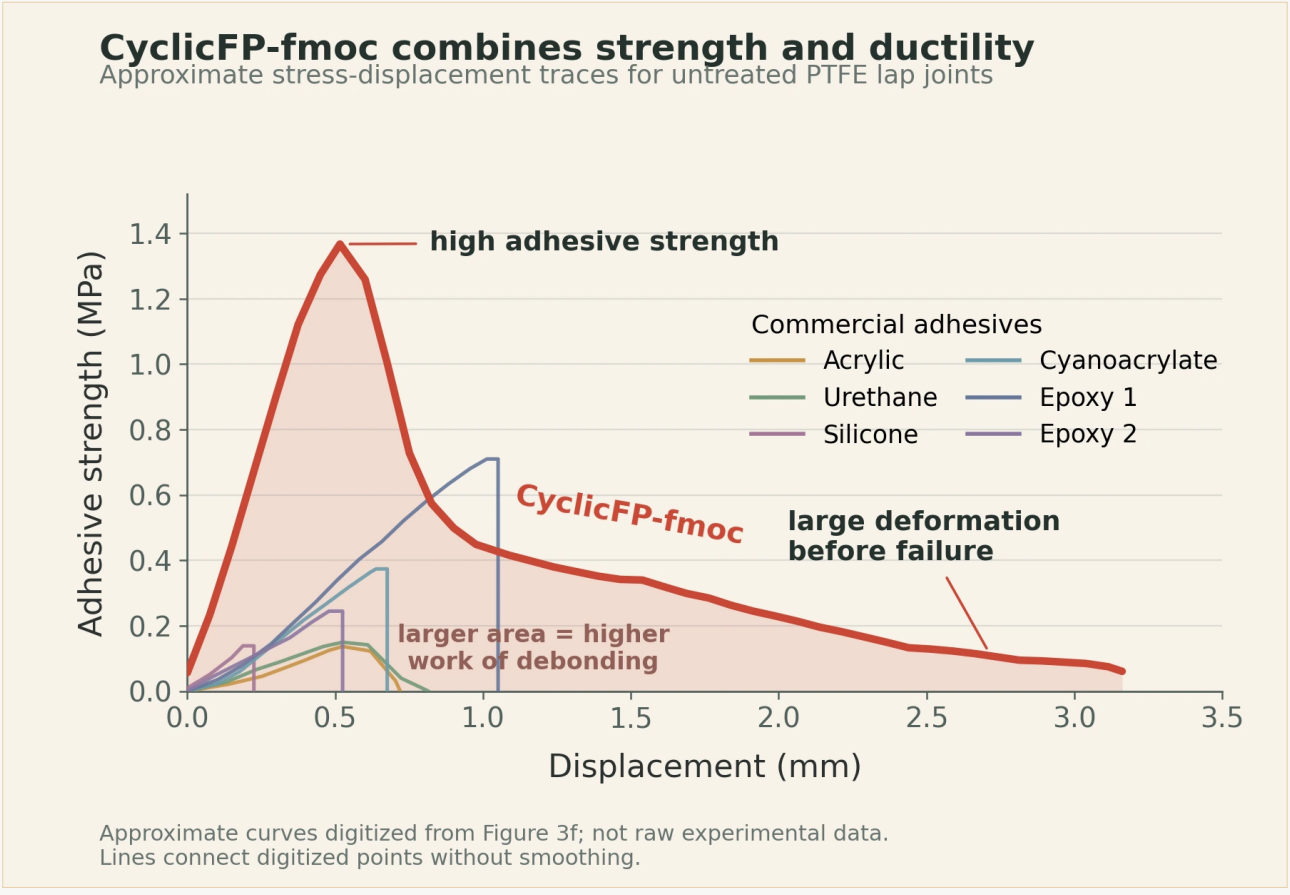
সংরক্ষণের পরও মান খুব বেশি বদলায়নি। স্বাভাবিক পরিবেশে 30 দিন রাখার পর আসঞ্জন শক্তি ছিল **1.3 ± 0.2 MPa**। পাতগুলো জোর করে আলাদা করে আবার ওভারল্যাপ করিয়ে গরম করার পর শক্তি ছিল **1.2 ± 0.2 MPa**। এই চক্র দশবার পুনরাবৃত্তির পরও মান ছিল প্রায় **1.3 ± 0.3 MPa**।

সেরা রূপভেদটি প্রধান অণু ছিল না। তিনটি fmoc দল-সহ সম্পর্কিত অণু **CyclicFP-fmoc3** PTFE-তে **2.3 ± 0.2 MPa** পর্যন্ত পৌঁছায়। তবু গবেষণাপত্রটি CyclicFP-fmoc-এর ওপর বেশি জোর দেয়, কারণ এটি শক্তি, নমনীয়তা, প্রক্রিয়ার পক্ষে প্রমাণ এবং মুছে সরানোর ক্ষমতা—সবকটি একসঙ্গে দেখায়।

দাবিটির দ্বিতীয় অর্ধ হলো নমনীয়তা

শুধু শক্তিশালী হলেই যথেষ্ট নয়। ভঙ্গুর আঠা অনেক বড় peak চাপ সহ্য করে তারপর হঠাৎ ভেঙে যেতে পারে। গবেষণাপত্রটির তুলনামূলকভাবে স্বতন্ত্র দাবি হলো CyclicFP-fmoc একই সঙ্গে নমনীয় আচরণও করে।

ল্যাপ-শিয়ার বক্ররেখায় CyclicFP-fmoc সর্বোচ্চ চাপে পৌঁছানোর পর স্থানচ্যুতি বাড়তে থাকলেও ধীরে ধীরে চাপ হারায়। গবেষণাপত্রে পরীক্ষিত বাণিজ্যিক আঠাগুলো তুলনামূলকভাবে ভঙ্গুর জোড়ের মতো আচরণ করছে: সর্বোচ্চ চাপের কিছু পরেই ব্যর্থতা হয়েছে।



CyclicFP-fmoc একটি উচ্চ চাপ peak-এর সঙ্গে peak-এর পর দীর্ঘ লেজ দেখায়; ছায়াযুক্ত অংশটি এর বেশি কাজ of বন্ধন ছুটে যাওয়া বোঝাতে সম্পাদকীয় নির্দেশক। চিত্র 3f থেকে আনুমানিক বক্ররেখা digitize করা হয়েছে; এগুলো কাঁচা পরীক্ষামূলক তথ্য নয়।

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

লখেকরো চাপ-স্থানচ্যুতি বক্ররখোর নচিরে ক্ষত্রেফলকে কাজ of বন্ধন ছুটে যাওয়া হসিবে মপেছেনে। PTFE-তে CyclicFP-fmoc-এর মান **1300 N/m**। পরীক্ষতি বাণজ্যকি আঠাগুলো র মান ছলি **26 থকেে 314 N/m**।

ভাঙনরে ধরনও এই ব্যাখ্যার সঙ্গে মলে। CyclicFP-fmoc-এর PTFE জো ড় cohesive ব্যর্থতা দখেয়িছে—অর্থাৎ আঠার ভতেরইে ভঙেছে। এর মানে পরীক্ষাগুলো তে PTFE সংযো গস্থল সামগ্রকি আঠা স্তররে চয়েে শক্তশিালী ছলি, আর আঠা নজিরে ভতেরে বক্রিত হয়ে শক্তি অপচয় করতে পরেছে।

চাপ শথিলিকরণ পরীক্ষা অণুগুলো র সময়মাত্রা সম্পর্কে আরও তথ্য দয়ে। 20 C-এ বশৈষ্ট্যি শথিলিকরণ সময় ছলি **60 ms**, এবং Arrhenius বশি্লষেণ থকেে activation শক্তি পাওয়া যায় **33.8 kJ/mol**। সহজ ভাষায়, হঠাৎ কন্দ্রীভূত চাপ এলে আঠার স্তরটি স্থরি ভঙ্গুর কঠনিরে মতো আচরণ না করে যথষ্টে দ্রুত পুনর্বন্যিাস করতে পারে।

লখেকরো কনে মনে করনে ফ্লো রনি গুরুত্বপূর্ণ

PTFE তরৈি কার্বন-ফ্লো রনি বন্ধন দয়িে। CyclicFP-fmoc-এ আছে ফ্লো রনিযুক্ত crown-ether দল। লখেকরো যুক্তি দনে, **F-F মথিস্ক্রয়িা** PTFE-তে আঠার সংযো গে সাহায্য করে, আর অন্য মথিস্ক্রয়িাগুলো আঠার স্তরকে একসঙ্গে ধরে রাখতে ও বক্রিত হতে সাহায্য করে।

কয়কেটি নয়িন্ত্রণ পরীক্ষা সইে দকিইে ইঙ্গতি দয়ে। CyclicFP-fmoc-এর ফ্লো রনি পরমাণুগুলো হাইড্রো জনে পরমাণু দয়িে বদলালে তরৈি CyclicP-fmoc PTFE-তে অনকে দুর্বলভাবে আটকায়—প্রায় **0.1 ± 0.0 MPa**। linear fluoro-ether ফসফটে AcyclicFP-fmoc পৌঁছায় মাত্র **0.3 ± 0.1 MPa**। pi-স্তরবন্যিাস বা হাইড্রো জনে-বন্ধন একক বাদ দওেয়া রূপভদেগুলো র ফলও খারাপ ছলি।

এরপর গবষেণাপত্রটি বর্ণালবিীক্ষণ ও স্ফটকি গঠন দয়িে মথিস্ক্রয়িার এই ধারণাকে সমর্থন করে। CyclicFP-fmoc স্ফটকিে প্রতবিশেী অণুর ফ্লো রনি পরমাণুগুলো র দূরত্ব **2.49 থকেে 2.91 অ্যাংস্ট্রম**, যা দুটি ফ্লো রনি পরমাণুর **2.94 অ্যাংস্ট্রম** van der Waals sum-এর চয়েে কম। FT-IR এবং চলক-তাপমাত্রা NMR amorphous আঠায় হাইড্রো জনে বন্ধন, F-F মথিস্ক্রয়িা ও pi-pi স্তরবন্যিাসরে পক্ষে প্রমাণ দয়ে।

PTFE-র ক্ষত্রেে সবচয়েে সরাসরি প্রমাণ আসে কঠনি-অবস্থা **19F MAS NMR** থকেে: CyclicFP-fmoc-কে PTFE nanoparticle বা পাতলা PTFE নর্দিশেনাপত্ররে সঙ্গে মশোলে বর্ণালি সরে যায়। ফ্লো রনি-বহীন নয়িন্ত্রণ একই সরণ তরৈি করে না। অর্থাৎ ফ্লো রনিযুক্ত অংশগুলো PTFE-র সঙ্গে মথিস্ক্রয়িা করে—এটি শুধু নকশা sketch নয়, পরীক্ষামূলক প্রমাণও।

তবু এটকিে “F-F বন্ধন-ই PTFE সমস্যার সমাধান” বলে সরল করা উচতি নয়। গবষেণাপত্রটরি নজিস্ব মডলে আরও স্তরযুক্ত: সংযো গস্থলে F-F মথিস্ক্রয়িা PTFE আসঞ্জনে সাহায্য করে, আর হাইড্রো জনে বন্ধন ও pi-pi স্তরবন্যিাস আঠার ভতেররে cohesion ও নমনীয়তায় অবদান রাখে।

মুছে ফলেে সরানো সত্যি, তবে সীমার মধ্যে

সরানো র ফলটইি ব্যবহারকিভাবে সবচয়েে আকর্ষণীয়। লখেকরো আলাদা করা PTFE পাত ইথানল দয়িে ধুয়ছেনে এবং তাদরে প্রদর্শনীতে CyclicFP-fmoc কো নো অবশষ্টিাংশ ছাড়াই পুরো পুরি সরছে বলে জানান। তারা আঠা উদ্ধার করে বারবার ব্যবহারও করছেনে; reuse পরীক্ষায় আসঞ্জন শক্তি ছলি প্রায় **1.2 ± 0.1 MPa**।

এটি গুরুত্বপূর্ণ, কারণ প্রচলতি শক্তশিালী আঠা প্রায়ই পরষ্কিারভাবে সরানো কঠনি। PTFE ধরে রাখতে পারে কন্তিু পরে ধুয়ে ফলো যায়—এমন আঠা মরোমত, বচ্ছিন্নি করা ও পুনর্ব্যবহারে কাজে লাগতে পারে।

তবে সীমাটি গুরুত্বপূর্ণ। গবেষণাপত্রটি নিয়ন্ত্রিত নমুনা পরীক্ষা করছে; সব ধরনের দূষিত শিল্পপৃষ্ঠ, আবহাওয়ায় ক্ষয়প্রাপ্ত জোড়, দ্রাবক পর্যবেক্ষণকাল বা দীর্ঘমেয়াদি বার্ধক্য নয়। PTFE পাত থেকে ইথানল দিয়ে মুছে ফেলা বহু-পদার্থের সমাবেশের পূর্ণ পুনর্ব্যবহার প্রক্রিয়া প্রমাণ করার সমান নয়।

গবেষণাপত্রে আরও বলা হয়েছে, CyclicFP-fmoc PFAS “forever রাসায়নিক” নয়। এই বক্তব্যকে সম্পূর্ণ পরিবেশগত ঝুঁকি-মূল্যায়ন হিসেবে বিস্তৃত করা উচিত নয়। স্থায়িত্ব, বিষাক্ততা, উৎপাদনের মাত্রা, পরিবেশে ছড়ানোর পথ এবং নিয়ন্ত্রণ—এসব আলাদা প্রশ্ন।

এটি কী প্রমাণ করে না

- এটি বাজারে প্রস্তুত কোনো আঠা পণ্য দেখায় **না**।
- এটি প্রমাণ করে **না** যে পৃষ্ঠ প্রস্তুতি ছাড়াই সব শিল্পিক্ষেত্রে PTFE এখন নির্ভরযোগ্যভাবে আঠা দিয়ে জোড়া যাবে।
- ইথানল দিয়ে সরানো সব substrate, পৃষ্ঠ শর্ত বা পুরোনো যৌথে সমান ভালো কাজ করে—এটি দেখায় **না**।
- F-F মিথস্ক্রিয়া একাই আসঞ্জন ব্যাখ্যা করে—এটি প্রমাণ করে **না**। গবেষণাপত্রের প্রক্রিয়ায় F-F, হাইড্রোজেন বন্ধন ও pi-pi স্তরবিন্যাস একসঙ্গে আছে।
- এটি সম্পূর্ণ plastic-পুনর্ব্যবহার কর্মপ্রবাহ দেখায় **না**।
- আঠার অণুগুলোর পূর্ণ পরিবেশগত বা toxicological নিরাপত্তা প্রোফাইল প্রতিষ্ঠা করে **না**।
- এর মানে বাণিজ্যিক আঠাগুলো সাধারণভাবে খারাপ নয়। তুলনাগুলো এই গবেষণাপত্রে পরীক্ষিত পদার্থ ও PTFE ল্যাপ-শিয়ার বিন্যাসের জন্য নির্দিষ্ট।

ফলটি কতটা শক্তিশালী?

পরীক্ষাগারভিত্তিক উপাদান গবেষণাপত্র হিসেবে ফলটি শক্তিশালী, কারণ লেখকেরা শুধু একটি বড় সংখ্যা জানাননি। তারা শক্তি, নমনীয়তা, 30 দিনের স্থায়িত্ব, পানির সহনশীলতা, পুনরায় জোড়া দেওয়া, ইথানল দিয়ে সরানো, বিভিন্ন আণবিক রূপভেদ এবং প্রস্তাবিত মিথস্ক্রিয়ার বর্ণালীবীক্ষণমূলক প্রমাণ পরীক্ষা করেছেন।

সবচেয়ে বিশ্বাসযোগ্য সমন্বয় হলো ব্যর্থতা ধরন ও নিয়ন্ত্রণ। PTFE সংযোগস্থল আগে ভেঙে গেলে দাবি দুর্বল হতো। তার বদলে যৌথটি আঠার স্তরের ভেতরে ভেঙেছে। আর ফলোরিনযুক্ত cyclic গঠন বাদ দিলে বা বদলালে PTFE আসঞ্জন দ্রুত কমে যায়।

বাকি প্রশ্ন হলো মাত্রা ও ব্যবহার কেস। ল্যাপ-শিয়ার পরীক্ষা মানসম্মত ও উপযোগী, কিন্তু বাস্তব যৌথে peel, আঘাত, ক্লান্তি, দূষণ, তাপমাত্রা চক্র ও মিশ্র উপাদানের প্রভাব থাকে। নিয়ন্ত্রিত পরীক্ষাগারের পাতের মাঝে খুব ভালো কাজ করা একটি অণুকেও প্রকৌশলগত আঠা হতে হলে ফরমুলেশন, প্রক্রিয়া এবং স্থায়িত্ব ডটোসটেে রূপ নিতে হবে।

কেন এটি গুরুত্বপূর্ণ

PTFE উপাদানবিজ্ঞানের একটি অস্বস্তিকর সীমায় আছে। এর নিষ্ক্রিয়তাই তাকে মূল্যবান করে, আবার একই বৈশিষ্ট্য মেরামতযোগ্য বা পুনর্ব্যবহারযোগ্য সমাবেশে-তে একে যুক্ত করা কঠিন করে।

এই গবেষণাপত্র brute বলের বদলে রাসায়নিকভাবে নির্দিষ্ট একটি পথ দেখায়। PTFE পৃষ্ঠকে খসখসে বা রাসায়নিকভাবে আক্রমণ করার বদলে এমন ছোট অণু নকশা করা হয়েছে, যা ওই পৃষ্ঠের সঙ্গে মিথস্ক্রিয়া করতে পারে এবং একই সঙ্গে নমনীয়, প্রত্যাবর্তনযোগ্য আঠার স্তর বজায় রাখে।

এই নকশা যুক্তি যদি অন্য ক্ষেত্রেও কাজ করে, তবে যান্ত্রিক কর্মক্ষমতা পুরো হারানো ছাড়াই সহজে সরানো ও পুনর্ব্যবহার করা যায়—এমন আঠা তৈরিতে সাহায্য করতে পারে। প্রকৃত প্রতিশ্রুতি একটি অণুকে প্রস্তুত আঠা বলা নয়; বরং শক্তিশালী, নমনীয় এবং পরে আলাদা করা যায় এমন আসঞ্জনের জন্য একটি আণবিক কৌশল।

সংক্ষিপ্ত সারাংশ

Kikkawa, Goswami ও সহকর্মীরা PTFE এবং অন্য substrate-এ fluoro-crown ether phosphate-জাত ছোট অণুকে adhesive হিসেবে পরীক্ষা করেছেন। প্রধান অণু CyclicFP-fmoc কোনো পূর্ব-চিকিৎসা ছাড়াই PTFE পাতকে lap-shear পরীক্ষায় **1.3 ± 0.1 MPa** শক্তিতে জোড়ে; ব্যর্থতা PTFE interface-এ নয়, adhesive স্তরের ভেতরেই হয়; বিচ্ছিন্ন করতে প্রায় **1300 N/m** কাজ লাগে; সংরক্ষণ ও বারবার পুনরায় জোড়ার পরও কর্মক্ষমতা থাকে; এবং ethanol দিয়ে ধুয়ে PTFE থেকে সরানো যায়। সম্পর্কিত একটি রূপভেদে **2.3 ± 0.2 MPa** পর্যন্ত পৌঁছায়। Spectroscopy ও control molecule-গুলো এমন একটি প্রক্রিয়াকে সমর্থন করে যেখানে F–F interaction PTFE interface-এ সাহায্য করে, আর hydrogen bonding ও pi–pi stacking adhesive স্তরে চাপ ছড়াতে সাহায্য করে। ফলটি PTFE-র জন্য শক্তিশালী, নমনীয় ও ধুয়ে সরানো যায় এমন adhesion-এর আশাব্যঞ্জক পরীক্ষাগার প্রদর্শন; এখনো বাণিজ্যিক adhesive, সর্বজনীন recycling solution বা পূর্ণ environmental-safety assessment নয়।

উৎস

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`