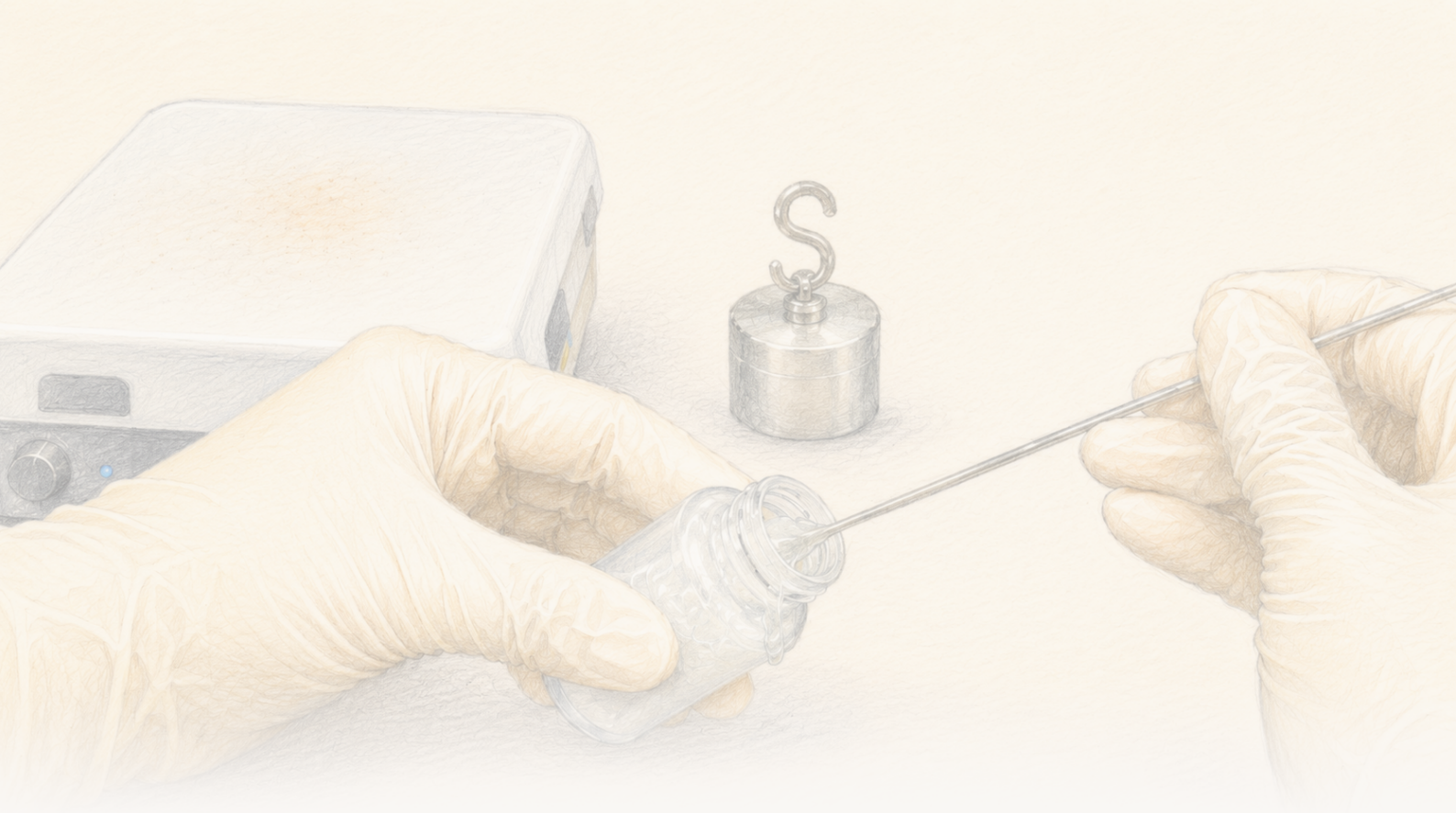


The Clean Paper

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

โมเลกุลขนาดเล็กยึด PTFE ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ แล้วล้างออกได้ด้วยเอทานอล

บทความใน JACS รายงานกาว fluoro-crown ether phosphate ที่ยึด PTFE ซึ่งขึ้นชื่อว่าเฉื่อยได้ในการทดสอบ lap-shear ในห้องปฏิบัติการ และยังถอดออกได้ด้วยการล้างเอทานอล CyclicFP-fmoc ให้ค่าความแข็งแรง 1.3 MPa บน PTFE ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ พร้อมการเสียหายแบบเหนียวภายในเนื้อกาว และอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องชนิดหนึ่งให้ 2.3 MPa กลไกได้รับการสนับสนุนจากหลักฐานสเปกโทรสโกปีของปฏิสัมพันธ์ฟลูออรีน-ฟลูออรีนที่ผิว PTFE รวมกับพันธะไฮโดรเจนและ pi-stacking ภายในกาว นี่เป็นผลวัสดุที่น่าสนใจ แต่ยังไม่ใช่กาวเชิงพาณิชย์ วิธีแก้การรีไซเคิลแบบสากล หรือการประเมินความปลอดภัยสิ่งแวดล้อมอย่างครบถ้วน

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 ติดกาวยากด้วยเหตุผลของมันเอง

พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน หรือที่รู้จักกันดีกว่าในชื่อ PTFE และจำหน่ายภายใต้ชื่อการค้าต่าง ๆ รวมถึง Teflon มีประโยชน์ส่วนหนึ่งก็เพราะมันไม่ค่อยอยากทำปฏิกิริยากับสิ่งอื่น พลังงานผิวของมันต่ำ ของเหลวจำนวนมากจึงรวมตัวเป็นหยดบนผิว และกาวหลายชนิดก็ติดไม่อยู่ เว้นแต่จะกัดผิว ทำให้ผิวหยาบ ใช้พลาสมาปรับสภาพ หรือใช้ไพรเมอร์เฉพาะทางร่วมด้วย

ความต้านทานนี้ยอดเยี่ยมสำหรับสารเคลือบกันติดและชิ้นส่วนที่ต้องการความเฉื่อยทางเคมี แต่กลายเป็นปัญหาเมื่อวิศวกรต้องการยึด PTFE เข้ากับชิ้นส่วนอื่นโดยไม่ทำลายพื้นผิวอย่างถาวร

บทความหนึ่งใน Journal of the American Chemical Society รายงานกาวโมเลกุลเล็กที่เข้าหาปัญหานี้จากทิศทางที่ไม่ธรรมดา Kohei Kikkawa, Abir Goswami และคณะอธิบายโมเลกุล fluoro-crown ether phosphate ที่สามารถยึดติดกับ PTFE ที่ไม่ได้ปรับสภาพได้อย่างแข็งแรง ยึดตัวแบบเหนียวก่อนขาด และจากนั้นล้างออกจากแผ่น PTFE ได้ด้วยเอทานอล

โมเลกุลหลักมีชื่อว่า **CyclicFP-fmoc** ในการทดสอบแรงเฉือนแบบ lap shear มันยึดแผ่น PTFE ที่ไม่ได้ปรับสภาพด้วยความแข็งแรงการยึดติด **1.3 ± 0.1 MPa** และมีงานในการแยกยึด (work of debonding) **1300 N/m** เนื่องจาก 1 MPa เท่ากับ 1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ความเค้นสูงสุด 1.3 MPa ที่วัดได้จึงเทียบได้กับแรงกดจากน้ำหนักแอปเปิลราว 130 กรัมลงบนทุก ๆ ตารางมิลลิเมตร นี่เป็นเพียงการเปรียบเทียบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ไม่ใช่แรงจริงหรือรูปทรงพื้นที่สัมผัสของชิ้นทดสอบ ค่า work of debonding ที่รายงาน 1300 N/m เทียบเท่ากับพลังงานแยกออก 1300 จูลต่อตารางเมตร สำหรับการสาธิตให้เห็นภาพโดยตรง—ไม่ใช่การรับรองพิกัดรับน้ำหนักทางวิศวกรรม—บทความแสดงรอยต่อพื้นที่ 7 cm^2 ที่รับตุ้มน้ำหนัก 8 kg ได้ รอยต่อขาดภายในชั้นกาว ไม่ใช่ที่รอยต่อระหว่างกาวกับ PTFE จุดนี้สำคัญ เพราะหมายความว่ารอยต่อกับ PTFE ไม่ใช่จุดอ่อนของการทดสอบ

ภาพวาดดินสออ้างอิงจากภาพถ่ายในบทความที่แสดงแถบกาวรับตุ้มน้ำหนักที่แขวนอยู่ (Figure 2, ซ้าย) ไม่ใช่ภาพถ่ายต้นฉบับ ไม่ใช่ภาพเขียนตามมาตราส่วน และไม่ใช่แผนภาพพิกัดรับน้ำหนักทางวิศวกรรม

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

ผลลัพธ์นี้ไม่ได้หมายความว่า “ปัญหา PTFE ถูกแก้แล้ว” มันเป็นผลการทดลองวัสดุในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุม แต่เป็นตัวอย่างที่ชัดเจนของการรวมคุณสมบัติที่ทำได้ยาก: ยึดติดแข็งแรง ขาดแบบเหนียว และเช็ดล้างออกได้จากพื้นผิวที่ขึ้นชื่อว่าต้านการยึดติด

เหตุใดความแข็งแรงกับการถอดออกง่ายจึงมักขัดแย้งกัน

กาวมักต้องแลกบางอย่าง กาวพอลิเมอร์เชื่อมขวางที่แข็งอาจแข็งแรง แต่ก็มักขาดแบบฉับพลันและล้างออกให้สะอาดยาก กาวนิ่มคล้ายเทปสามารถยืดและสลายพลังงานได้ แต่โดยทั่วไปก็ต้องแลกกับความแข็งแรง

ความขัดแย้งนี้เกิดในระดับโมเลกุล ความแข็งแรงต้องการการถ่ายโอนความเค้นอย่างมีประสิทธิภาพ ความเหนียวต้องการการเคลื่อนไหว การจัดเรียงใหม่ และการสลายพลังงาน ส่วนการถอดออกง่ายต้องการพันธะที่แตกได้โดยไม่ทำลายวัสดุรองรับ เงื่อนไขเหล่านี้ดึงไปคนละทิศ

กาวโมเลกุลเล็กน่าสนใจเพราะโดยหลักการแล้วสามารถถอดออกและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มันไม่ได้สร้างโครงข่ายพอลิเมอร์ยาวที่พันกัน ซึ่งทำให้กาวทั่วไปหลายชนิดเหนียว แต่นั่นก็เป็นจุดอ่อนเช่นกัน: เมื่อไม่มีการพันกันของสายโซ่ โมเลกุลเล็กโดยปกติจะสร้างการยึดติดที่ทั้งเหนียวและแข็งแรงได้ยาก

บทความ JACS นี้พยายามแทนที่การพันกันของพอลิเมอร์ด้วยชุดปฏิสัมพันธ์แบบไม่โควาเลนต์ที่ย้อนกลับได้ โมเลกุลรวมส่วน fluoro-crown ether phosphate เข้ากับหมู่ fmoc ที่เชื่อมผ่านยูรีเทน พูดง่าย ๆ คือ วงแหวนที่มีฟลูออรีนสามารถมีปฏิสัมพันธ์กับพื้นผิว PTFE ที่อุดมด้วยฟลูออรีน หมู่ยูรีเทนสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลกาวข้างเคียง และหมู่ฟลูออเรนิลที่แบนสามารถซ้อนกันได้ เป้าหมายในการออกแบบไม่ใช่พันธะมหัศจรรย์เพียงชนิดเดียว แต่คือชุดปฏิสัมพันธ์อ่อน ๆ ที่ย้อนกลับได้และทำงานร่วมกัน:

- ปฏิสัมพันธ์ฟลูออรีน-ฟลูออรีนบริเวณใกล้ PTFE;
- พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลกาว;
- การซ้อนแบบ pi-pi ระหว่างหมู่ฟลูออเรนิล;
- และความคล่องตัวของโมเลกุลที่เพียงพอให้คลายความเค้น แทนที่จะแตกร้าวทันที

การทดสอบ PTFE หลักแสดงอะไร

ผู้เขียนวาง CyclicFP-fmoc ระหว่างแผ่น PTFE ที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวหรือทำความสะอาด ให้ความร้อนกาว แล้วพักแผ่นไว้ที่อุณหภูมิห้อง 10 นาทีก่อนทดสอบ

สำหรับการทดสอบเชิงปริมาณ พวกเขาใช้ lap shear แผ่น PTFE ที่ยึดด้วย CyclicFP-fmoc รับความเค้นดึงได้ **1.3 ± 0.1 MPa** โดยรายงานเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดสามครั้ง การทากาวที่ประมาณ **50 C** ด้วยไดร์เปาผมให้ค่าคล้ายกัน คือ **1.1 ± 0.1 MPa** แสดงว่าไม่จำเป็นต้องหลอมด้วยอุณหภูมิสูงเท่านั้น

ผู้เขียนเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับกาวเชิงพาณิชย์ชนิดอีพ็อกซี อะคริลิก ซิลิโคน และยูรีเทน ในชุดทดสอบ lap shear บน PTFE

แบบเดียวกัน กาวควบคุมเหล่านั้นให้ค่าราว **0.1 ถึง 0.7 MPa** เทียบกับ **1.3 ± 0.1 MPa** สำหรับ CyclicFP-fmoc การเปรียบเทียบบนวัสดุรองรับเดียวกันและด้วยวิธีเดียวกันนี้ให้ข้อมูลมากกว่าการนำค่า MPa จากวัสดุและรูปทรงการทดสอบต่างกันมาเรียงอันดับรวมกัน

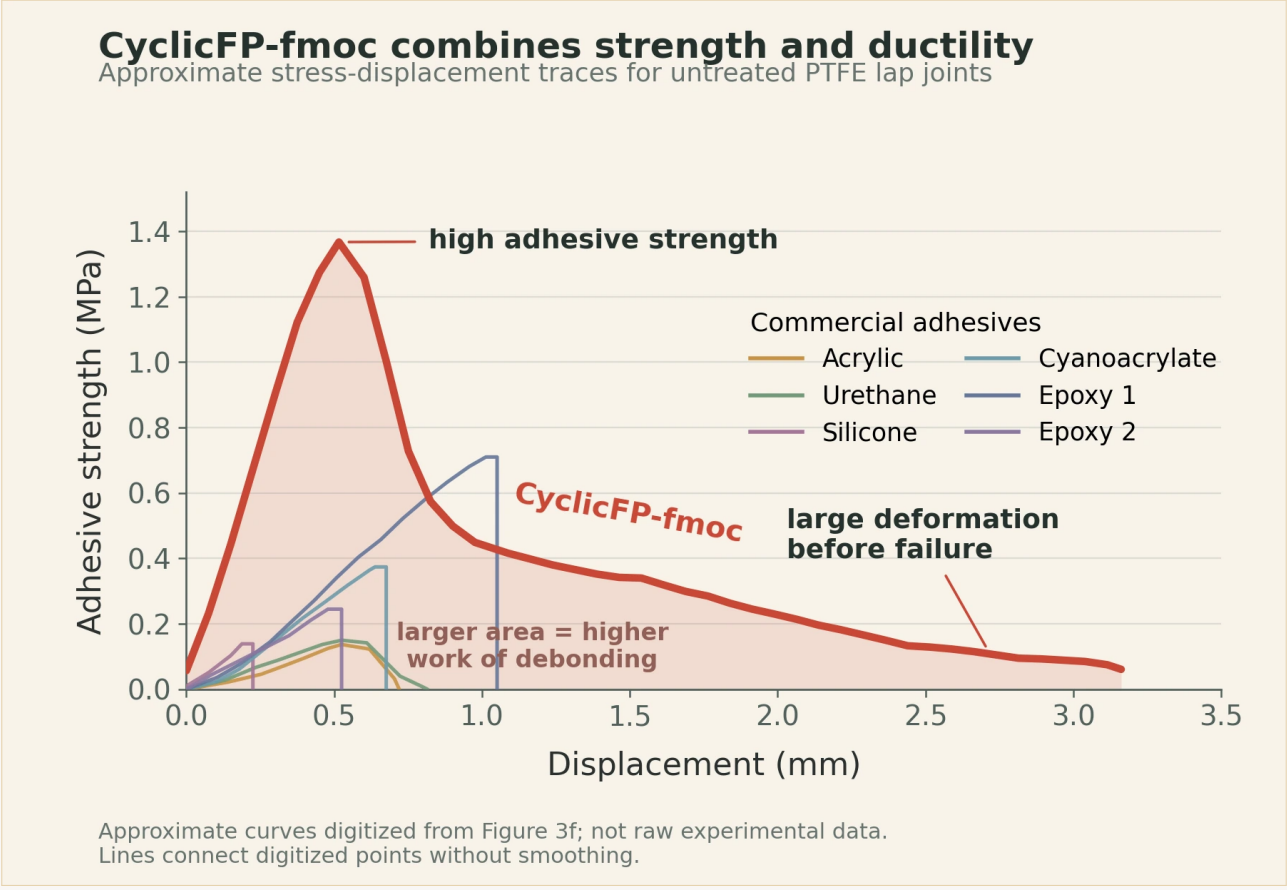
ตัวเลขยังคงใกล้เดิมหลังเก็บไว้ หลัง 30 วันที่สภาวะแวดล้อมทั่วไป ความแข็งแรงการยึดติดอยู่ที่ **1.3 ± 0.2 MPa** หลังแยกแผ่นออกด้วยแรง นำมาซ้อนกันใหม่ และให้ความร้อนอีกครั้ง ความแข็งแรงอยู่ที่ **1.2 ± 0.2 MPa** และเมื่อทำซ้ำวงจรนี้สิบครั้งก็ยังได้ประมาณ **1.3 ± 0.3 MPa**

ตัวแปรที่ดีที่สุดไม่ใช่โมเลกุลหลัก โมเลกุลใกล้เคียงที่มีหมู่ fmoc สามหมู่ คือ **CyclicFP-fmoc3** ให้ค่า **2.3 ± 0.2 MPa** บน PTFE อย่างไรก็ตาม บทความยังเน้น CyclicFP-fmoc มาก เพราะมันแสดงการผสมผสานทั้งหมดทั้งความแข็งแรง ความเหนียว หลักฐานเชิงกลไก และการเช็ดล้างออก

ความเหนียวคืออีกครึ่งหนึ่งของข้อกล่าวอ้าง

ความแข็งแรงอย่างเดียวไม่พอ กาวเปราะอาจรับความเค้นสูงสุดได้มากแล้วขาดทันที ข้อกล่าวอ้างที่โดดเด่นกว่าของบทความคือ CyclicFP-fmoc ยังมีพฤติกรรมแบบเหนียวด้วย

ในกราฟ lap shear CyclicFP-fmoc ขึ้นถึงความเค้นสูงสุดแล้วค่อย ๆ สูญเสียความเค้นเมื่อการกระจัดเพิ่มต่อไป ส่วนกาวเชิงพาณิชย์ที่ทดสอบในบทความมีพฤติกรรมคล้ายรอยต่อเปราะมากกว่า: ขาดไม่นานหลังแตะความเค้นสูงสุด



CyclicFP-fmoc รวมยอดความเค้นที่สูงกับหางกราฟหลังยอดที่ยาว; พื้นที่แรเงาเป็นคำแนะนำเชิงบรรณาธิการให้เห็นค่า work of debonding ที่มากกว่า เส้นโค้งโดยประมาณถอดค่าจาก Figure 3f; ไม่ใช่ข้อมูลทดลองดิบ

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

ผู้เขียนหาปริมาณพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-การกระจัดนั้นเป็น work of debonding CyclicFP-fmoc ให้ค่า **1300 N/m** บน PTFE ส่วนกาวเชิงพาณิชย์ที่ทดสอบอยู่ระหว่าง **26 ถึง 314 N/m**

รูปแบบการขาดสอดคล้องกับการตีความนี้ รอยต่อ PTFE ที่ใช้ CyclicFP-fmoc ขาดแบบ cohesive คือขาดภายในเนื้อกาว นั่นบ่งชี้ว่ากาวสามารถสลายพลังงานผ่านการเสียรูปภายใน ขณะที่รอยต่อกับ PTFE ยังคงแข็งแรงกว่าเนื้อกาวในชุดทดสอบเหล่านี้

การทดลองคลายความเค้นช่วยบอกสเกลเวลาระดับโมเลกุล ที่ 20 C เวลาคลายตัวลักษณะเฉพาะอยู่ที่ **60 ms** และการวิเคราะห์แบบ Arrhenius ให้พลังงานก่อกัมมันต์ **33.8 kJ/mol** พูดง่าย ๆ ชั้นกาวสามารถจัดเรียงใหม่ได้เร็วพอที่จะบรรเทาบริเวณที่ความเค้นกระจุกตัวอย่างฉับพลัน แทนที่จะทำตัวเป็นของแข็งเปราะที่นึ่งตายตัว

เหตุใดผู้เขียนจึงคิดว่าฟลูออรีนสำคัญ

PTFE สร้างจากพันธะคาร์บอน-ฟลูออรีน CyclicFP-fmoc มีหมู่ crown ether ที่มีฟลูออรีน ผู้เขียนเสนอว่า **ปฏิสัมพันธ์ F-F** ช่วยให้กาวยึด PTFE ขณะที่ปฏิสัมพันธ์ชนิดอื่นช่วยให้ชั้นกาวยึดตัวกันเองและเสียรูปได้

การทดลองควบคุมหลายชุดชี้ไปในทิศทางนั้น เมื่ออะตอมฟลูออรีนใน CyclicFP-fmoc ถูกแทนด้วยอะตอมไฮโดรเจน CyclicP-fmoc ที่ได้ยึด PTFE อ่อนลงมาก อยู่ราว **0.1 ± 0.0 MPa** ส่วน fluoro-ether phosphate แบบสายตรง AcyclicFP-fmoc ให้เพียง **0.3 ± 0.1 MPa** ตัวแปรที่ไม่มีหน่วยสำหรับการซ้อนแบบ pi หรือพันธะไฮโดรเจนก็ทำได้แย่ลงเช่นกัน

จากนั้นบทความใช้สเปกโทรสโกปีและโครงสร้างผลึกสนับสนุนภาพของปฏิสัมพันธ์นี้ ในผลึก CyclicFP-fmoc อะตอมฟลูออรีนบนโมเลกุลข้างเคียงอยู่ห่างกัน **2.49 ถึง 2.91 อังสตรอม** สั้นกว่าผลรวมรัศมี van der Waals ของฟลูออรีนสองอะตอมที่ **2.94 อังสตรอม** FT-IR และ NMR แบบปรับอุณหภูมิสนับสนุนการมีพันธะไฮโดรเจน ปฏิสัมพันธ์ F-F และการซ้อน pi-pi ในกาวอสัณฐาน

หลักฐานที่ตรงกับ PTFE มากที่สุดคือ สเปกตรัม **19F MAS NMR** แบบของแข็งเกิดการเลื่อนเมื่อผสม CyclicFP-fmoc กับอนุภาคนาโน PTFE หรือแผ่น PTFE บาง ๆ ส่วนตัวควบคุมที่ไม่มีฟลูออรีนไม่ให้การเลื่อนแบบเดียวกัน นี่เป็นหลักฐาน—ไม่ใช่เพียงภาพตามแนวคิดการออกแบบ—ว่าส่วนที่มีฟลูออรีนของกาวมีปฏิสัมพันธ์กับ PTFE

อย่างไรก็ดี ไม่ควรย่อเรื่องนี้เหลือว่า “พันธะ F-F แก้ปัญหา PTFE” แบบจำลองกลไกของบทความเองซับซ้อนกว่านั้น: ปฏิสัมพันธ์ F-F ที่รอยต่อช่วยการยึดติดกับ PTFE ส่วนพันธะไฮโดรเจนและการซ้อน pi-pi ช่วยเรื่องแรงยึดภายในและความเหนียวของชั้นกาว

การเช็ดล้างออกทำได้จริง แต่มีขอบเขต

ผลการถอดออกคือจุดดึงดูดในเชิงปฏิบัติ ผู้เขียนล้างแผ่น PTFE ที่แยกออกแล้วด้วยเอทานอล และรายงานว่าในตัวอย่างสาธิตสามารถล้าง CyclicFP-fmoc ออกหมดโดยไม่เหลือคราบ พวกเขายังกู้คืนกาวและนำกลับมาใช้ซ้ำหลายครั้ง โดยยังคงความแข็งแรงการยึดติดราว **1.2 ± 0.1 MPa** ในการทดสอบใช้ซ้ำ

นี่สำคัญเพราะกาวแข็งแรงแบบเดิมมักถอดออกให้สะอาดยาก กาวที่ยึด PTFE ได้และภายหลังล้างออกได้จะมีประโยชน์ต่อการซ่อม การถอดประกอบ และการนำกลับมาใช้ใหม่

แต่ขอบเขตของผลลัพธ์สำคัญมาก บทความทดสอบตัวอย่างที่ควบคุม ไม่ใช่ทุกพื้นผิวอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อน รอยต่อที่ผ่าน

สภาพอากาศ การสัมผัสตัวทำละลาย หรือสภาวะแก่ตัวระยะยาว การเช็ดออกด้วยเอทานอลบนแผ่น PTFE ไม่เท่ากับพิสูจน์กระบวนการรีไซเคิลแบบครบวงจรสำหรับชิ้นงานประกอบที่มีวัสดุหลายชนิด

บทความยังระบุว่า CyclicFP-fmoc ไม่ใช่ PFAS “สารเคมีตลอดกาล” แต่ไม่ควรขยายข้อความนั้นให้กลายเป็นการประเมินความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อมอย่างสมบูรณ์ ความคงทน ความเป็นพิษ การผลิตระดับใหญ่ เส้นทางการปล่อยออก และกฎระเบียบเป็นคำถามคนละเรื่องกัน

สิ่งที่งานนี้ไม่ได้พิสูจน์

- **ไม่ได้** แสดงผลิตภัณฑ์กาวที่พร้อมออกสู่ตลาด
- **ไม่ได้** พิสูจน์ว่าต่อไปนี้ PTFE จะยึดติดได้อย่างน่าเชื่อถือในทุกสภาพอุตสาหกรรมโดยไม่ต้องปรับสภาพผิว
- **ไม่ได้** แสดงว่าการล้างด้วยเอทานอลทำงานได้ดีเท่ากันบนวัสดุรองรับทุกชนิด ทุกสภาพพื้นผิว หรือรอยต่อที่ผ่านการแก่ตัว
- **ไม่ได้** พิสูจน์ว่าปฏิสัมพันธ์ F-F เพียงอย่างเดียวอธิบายการยึดติด กลไกในบทความรวม F-F พันธะไฮโดรเจน และการซ้อน pi-pi
- **ไม่ได้** แสดงกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกแบบครบวงจร
- **ไม่ได้** สร้างข้อมูลความปลอดภัยด้านสิ่งแวดล้อมหรือพิษวิทยาที่สมบูรณ์สำหรับโมเลกุลกาว
- **ไม่ได้** หมายความว่ากาวเชิงพาณิชย์โดยทั่วไปแย่กว่า การเปรียบเทียบจำกัดเฉพาะวัสดุและชุดทดสอบ lap shear บน PTFE ที่ใช้ในบทความนี้

ผลลัพธ์แข็งแรงแค่ไหน?

สำหรับบทความวัสดุในห้องปฏิบัติการ ผลลัพธ์ถือว่าแข็งแรงเพราะผู้เขียนไม่ได้รายงานแค่ตัวเลขสูงเพียงค่าเดียว แต่ทดสอบความแข็งแรง ความเหนียว ความคงทนตลอด 30 วัน ความทนต่อน้ำ การยึดติดซ้ำหลายรอบ การล้างด้วยเอทานอล โมเลกุลตัวแปรต่าง ๆ และหลักฐานสเปกโทรสโกปีสำหรับปฏิสัมพันธ์ที่เสนอ

ส่วนที่โน้มน้าวที่สุดคือการรวมรูปแบบการขาดเข้ากับชุดควบคุม หากรอยต่อกับ PTFE ขาดก่อน ข้อกล่าวอ้างจะอ่อนลง แต่ที่เห็นคือรอยต่อขาดภายในชั้นกาว และเมื่อเอาหรือเปลี่ยนโครงสร้างวงแหวนที่มีฟลูออรีนออก ความสามารถยึด PTFE ก็ลดฮวบ

คำถามที่ยังเหลือคือเรื่องขนาดและกรณีใช้งาน การทดสอบ lap shear มีมาตรฐานและมีประโยชน์ แต่รอยต่อจริงต้องเจอแรงลอก แรงกระแทก ความล้า การปนเปื้อน วงจรอุณหภูมิ และวัสดุหลายชนิด โมเลกุลที่ทำงานได้สวยงามระหว่างแผ่นทดสอบในห้องปฏิบัติการยังต้องพัฒนาเป็นสูตร กระบวนการ และชุดข้อมูลความทนทาน ก่อนจะกลายเป็นกาววิศวกรรม

ทำไมเรื่องนี้จึงสำคัญ

PTFE อยู่บนรอยต่อทางวัสดุที่น่าอึดอัด ความเฉื่อยคือคุณสมบัติที่ทำให้มันมีค่า และคุณสมบัติเดียวกันก็ทำให้รวมมันเข้ากับชิ้นงานที่ซ่อมหรือรีไซเคิลได้ยาก

บทความนี้เสนอวิธีที่จำเพาะทางเคมีแทนการใช้กำลังบังคับ แทนที่จะทำให้ผิว PTFE หยาบหรือกัดผิวด้วยสารเคมี ผู้เขียนออกแบบโมเลกุลเล็กที่มีปฏิสัมพันธ์กับพื้นผิวนั้นได้ พร้อมรักษาชั้นกาวที่เหนียวและย้อนกลับได้

หากตรรกะการออกแบบนี้ใช้กับระบบอื่นได้ มันอาจช่วยสร้างกาวที่ถอดและนำกลับมาใช้ใหม่ง่ายขึ้น โดยไม่ต้องสละสมบัติเชิงกลทั้งหมด นั่นคือคำมั่นที่แท้จริง: ไม่ใช่โมเลกุลหนึ่งตัวในฐานะกาวสำเร็จรูป แต่เป็นกลยุทธ์ระดับโมเลกุลสำหรับการยึดติดที่แข็งแรง เหนียว และถอดออกได้

สรุป

Kikkawa, Goswami และคณะรายงานโมเลกุลเล็ก fluoro-crown ether phosphate เป็นกาวสำหรับ PTFE และวัสดุรองรับชนิดอื่น โมเลกุลหลัก CyclicFP-fmoc ยึดแผ่น PTFE ที่ไม่ได้ปรับสภาพได้ **1.3 ± 0.1 MPa** ในการทดสอบ lap shear ขาดแบบ cohesive แทนที่จะขาดที่รอยต่อ PTFE มี work of debonding **1300 N/m** รักษาสมรรถนะได้หลังการเก็บและการยึดซ้ำหลายรอบ และล้างออกจากแผ่น PTFE ได้ด้วยเอทานอล ตัวแปรใกล้เคียงให้ค่า **2.3 ± 0.2 MPa** หลักฐานจากสเปกโทรสโกปีและโมเลกุลควบคุมสนับสนุนกลไกที่ปฏิสัมพันธ์ F-F ช่วยรอยต่อกับ PTFE ขณะที่พันธะไฮโดรเจนและการซ้อน pi-pi ช่วยให้ชั้นกาวสลายความเค้น ผลลัพธ์นี้เป็นการสาธิตในห้องปฏิบัติการที่น่าสนใจของการยึด PTFE แบบแข็งแรง เหนียว และเช็ดล้างออกได้ ยังไม่ใช่กาวเชิงพาณิชย์ วิธีแก้รีไซเคิลสากล หรือการประเมินความปลอดภัยด้านสิ่งแวดล้อมอย่างครบถ้วน

แหล่งข้อมูล

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