

الیاف پلی تترا فلوئور اتیلن (تفلون)

Polytetrafluoroethylene (Teflon) Fibers

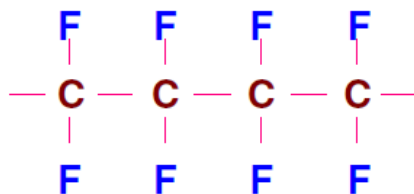
واحد نوآوری

کلمات کلیدی: پلی تترا فلوئور اتیلن (PTFE)، روش matrix-spun، روش paste extrusion، الیاف ePTFE.

ماده پلیمری پلی تترافلوئور اتیلن¹ برای اولین بار به طور اتفاقی در سال 1938 توسط روی پلونکت² زمانی که وی در شرکت Kinetic Chemicals واقع در نیوجرسی مشغول به کار بود، کشف گردید. هنگامی که پلونکت در تلاش به منظور ساخت یک نوع گاز خنک کننده بر پایه کلروفلوئورکربن بود، گاز تترا فلوئور اتیلن در فشار محفظه مخصوص به خود پیش از خالی شدن کامل و کاهش وزن تا مقدار صفر، از جریان افتاد. پلونکت با اندازه گیری وزن محفظه و باز نمودن آن متوجه شد جداره داخلی محفظه شیشه ای از یک ماده سفید واکس مانند و به شکلی عجیب لگزنده پوشیده شده است. آنالیز مواد نشان از وجود پرفلوئور اتیلن پلیمریزه شده می داد. در واقع آهن موجود در جداره داخلی محفظه به عنوان کاتالیزر در فشار بالا عمل کرده بود. شرکت Kinetic Chemicals این ماده را به نام پلاستیک فلوئوره شده جدید ثبت اختراع نمود و بعدها به نام تفلون³ شناخته شد [1].

مشخصات فلوئور پلیمر⁴

به طور کلی فلوئور پلیمر و یا فلوئور پلاستیک دارای ساختاری شامل کربن (C) و فلوئور (F) است. گاهی از این مواد به عنوان پرفلوئور پلیمرها⁵ یاد می شود تا از پلیمرهای فلوئوره مشابه تمییز داده شود. فلوئور الاستومرها⁶ نیز نوع دیگری از پلیمرهای محتوی فلوئور در ساختار خود محسوب می شوند. به عنوان نمونه فلوئور سیلیکون (fluorosilicone) و فلوئور اکریلات در دسته فلوئور پلیمرها جای نمی گیرند. یکی از معروفترین فلوئور پلیمرها PTFE است (شکل 1) [1].



شکل 1. ساختار پلیمر PTFE [1]

¹ polytetrafluoroethylene (PTFE)

² Roy Plunkett

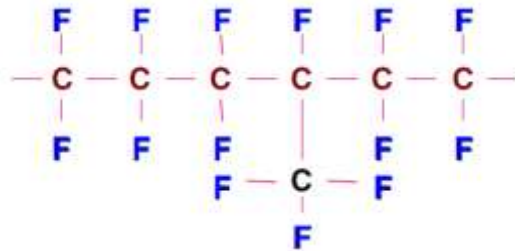
³ Teflon

⁴ fluoropolymer

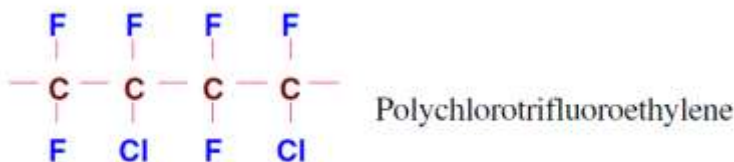
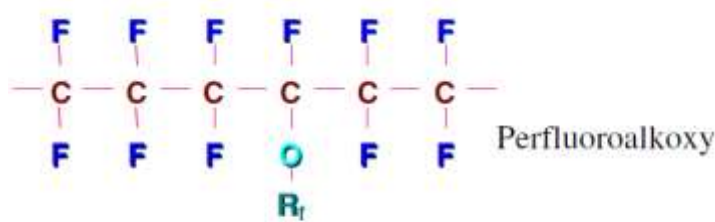
⁵ perfluoropolymers

⁶ fluoroelastomers

تعریفی ساده از ساختار فلوئور پلیمرها شامل ترکیب شیمیایی پلی اتیلن $[(-CH_2-CH_2-)_n]$ است در شرایطی که تمامی اتم های هیدروژن با اتم های فلوئور جایگزین شده باشند. با این حال، پلی اتیلن و PTFE روش تولید کاملاً متفاوتی دارند. از دیگر مهم ترین پلیمرهای خانواده فلوئور پلیمرها می توان به اتیلن پروپیلن فلوئور¹ (شکل 2)، پر فلوئور آکوکسی² و پلی کلرو تری فلوئور اتیلن³ (شکل 3) اشاره نمود که ساختار برخی نخ های صنعتی را تشکیل می دهند [1].



شکل 2. ساختار پلیمر FEP [1]



شکل 3. ساختار پلیمرهای PFA و PCTFE [1]

در ساختارهای فوق، گروه R_f گروه پرفلوئور شامل کربن و فلوئور است. در کنار ساختارهای مفروض، کلاس ثانویه از فلوئور پلیمرها وجود دارد که تحت عنوان شبه فلوئور⁴ وجود دارد که در تقابل با پرفلوئور پلیمرها قرار دارد. این مولکولها علاوه بر کربن و فلوئور شامل هیدروژن (H) نیز در ساختار خود می شوند. کو پلیمرهای پلی وینیل فلوئور⁵، پلی وینیلیدین فلوئور⁶ و اتیلن تترا فلوئور اتیلن⁷ نمونه های از این گروه پلیمرها محسوب می شوند (شکل 4) [1].

¹ Fluorinated ethylene propylene (FEP)

² perfluoroalkoxy (PFA)

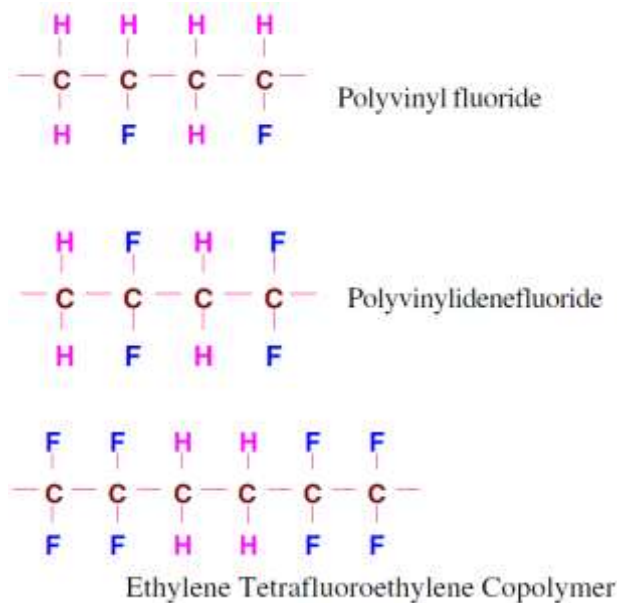
³ polychlorotrifluoroethylene (PCTFE)

⁴ partially fluorinated

⁵ polyvinylfluoride (PVF)

⁶ Polyvinylidene fluoride (PVDF)

⁷ ethylene tetrafluoroethylene (ETFE)



شکل 4. ساختار پلیمرهای PVF، PVDF، ETFE [1]

خواص PTFE

خواص اصلی PTFE نشأت گرفته از ساختار اتم‌های سازنده آن یعنی کربن و فلورین است که با پیوندهای شیمیایی کووالانسی به یکدیگر متصل شده‌اند. در جدول (1) خلاصه‌ای از خصوصیات این پلیمر ارائه شده است [1].

جدول 1. خصوصیات اصلی PTFE [1]

دمای ذوب بالا، 342°C (684°F)
پایداری حرارتی بالا
خواص مکانیکی کاربردی در دماهای به شدت پایین و بالا
نامحلول
عدم واکنش‌پذیری شیمیایی
ضریب اصطکاک پایین
ثابت دی‌الکتریک پایین
جذب رطوبت کم
پایداری عالی در شرایط جوی مختلف
مقاوم در برابر شعله
خلوص بالا

روند توسعه فلورین پلیمرها از سال 1938 با اختراع PTFE آغاز و تا سال 1992 و معرفی پرفلورین پلیمر محلول (تفلون AF) ادامه یافت. در جدول (2) خلاصه‌ای از این روند توسعه ارائه شده است [1]. مشهودترین ضعف PTFE کشف شده، عدم امکان تولید به روش مذاب بود. توسعه فرآیند تولید این پلیمر منجر

به تولید اتیلن پروپیلن فلئوروره¹ با استفاده از اکسترودر در حالت مذاب گردید. با این حال، مشهودترین ضعف FEP نسبت به PTFE، خواص مکانیکی پایین تر در بالاترین دمای کارکرد پیوسته (200°C) است. معرفی پلیمر پر فلئور آلکوکسی² در سال 1973 هر دو مشخصه امکان تولید به صورت مذاب و دمای کارکرد پیوسته بالا (260°C) را دارا بود.

جدول 2. خط زمانی روند توسعه تجاری فلئور پلیمرها نسبت به شرایط تعادلی فرآیند و کاربرد [1]

Fluoropolymer	Year Commercialized	Monomers	Trade-off +	Trade-off -
PTFE	1947	TFE	Continuous use temperature 260 °C	Nonmelt-processible
PCTFE	1953	CTFE	Melt-processible/ Nonmelt-processible	Maximum continuous use temperature 180 °C
FEP	1960	TFE, HFP ^c	Melt-processible	Maximum continuous use temperature 200 °C
PVF	1961	VF ^a	Thin film/weatherable	Maximum continuous use temperature 107 °C
PVDF	1961	VDF ^b	Melt-processible	Maximum continuous use temperature 150 °C
ECTFE	1970	CTFE, E ^d	Hardness/toughness	Maximum continuous use temperature 150 °C
PFA	1972	TFE, PAVE ^e	Melt-processible. Continuous use temperature 260 °C	Low molecular weight
ETFE	1973	TFE, E	Hardness/toughness	Maximum continuous use temperature 150 °C
Teflon [®] AF	1985	TFE, PDD ^f	Soluble in special halogenated solvents	High cost

PTFE, polytetrafluoroethylene; TFE, tetrafluoroethylene; PCTFE, polychlorotrifluoroethylene; CTFE, chlorotrifluoroethylene; FEP, fluorinatedethylene propylene; HFP, hexafluoropropylene; PVF, polyvinylfluoride; PVDF, polyvinylidene fluoride; ECTFE, ethylene chlorotrifluoroethylene; PFA, perfluoroalkoxy; ETFE, ethylene tetrafluoroethylene; VDF, vinylidene fluoride; E, ethylene; PAVE, perfluoroalkylvinylether; VF, vinylfluoride; PDD, 2,2-bistrifluoromethyl-4,5 difluoro-1,3-dioxole.

^a Vinyl fluoride (CH₂=CHF).

^b Vinylidene fluoride (CH₂=CF₂).

^c Hexafluoropropylene (CF₂=CF-CF₃).

^d Ethylene (CH₂=CH₂).

^e Perfluoroalkylvinylether (CF₂=CF-O-R_f).

تهیه تترافلئور اتیلن³

واحد اصلی ساختار اتیلن فلئور پلیمرها و به خصوص PTFE از TFE ($CF_2 = CF_2$) تشکیل شده است. متداولترین روش تولید TFE، پیرولیز کلردی فلئور متان⁴ است که تحت عنوان HCFC-22 شناخته می شود. این فرآیند با حذف یک مولکول هیدروکلریک اسید (HCl) آغاز و متعاقب آن با واکنش رادیکال آزاد (CF_2) تولید شده به وسیله دی هیدروکلروزاسیون⁵ ادامه می یابد. جفت رادیکال آزاد CF_2 با یکدیگر ترکیب شده تا C_2F_4 تولید نمایند.

¹ Fluorinatedethylene propylene (FEP)

² Perfluoroalkoxy (PFA)

³ Tetrafluoroethylene (TFE)

⁴ chlorodifluoromethane (CHClF₂)

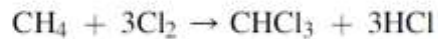
⁵ dehydrochlorination

روش تجاری تولید TFE، شامل استفاده از فلوئورسپار¹ (CaF_2)، هیدروفلوئوریک اسید و کلروفرم می‌شود. مراحل کلی واکنش‌ها در شکل (5) ارائه شده است [1].

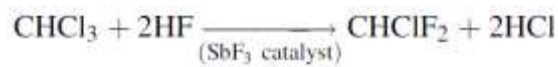
HF preparation:



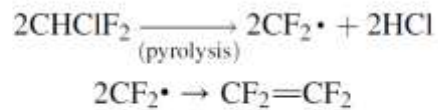
Chloroform preparation:



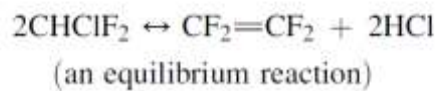
Chlorodifluoromethane preparation:



TFE synthesis:

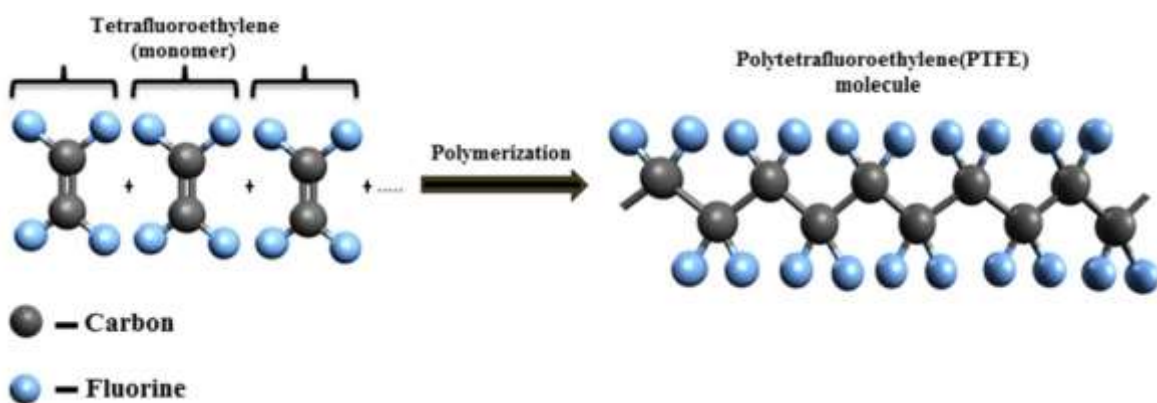


The overall pyrolysis reaction is:



شکل 5. واکنش‌های شیمیایی تولید TFE [1]

در شکل (6) ساختار مولکولی PTFE حاصل از پلیمریزاسیون TFE نشان داده شده است [2].



شکل 6. ساختار مولکولی PTFE [2]

¹ fluorspar

کاربرد PTFE

پلیمر PTFE از زمان کشف، به دلیل پایداری شیمیایی و حرارتی بالا، خواص دی الکتریک و استحکام مکانیکی چشمگیر در طیف گسترده ای از زمینه های کاربردی وارد شده است. زمینه های خانگی، صنعتی، دفاعی و استفاده به صورت های خالص و یا کامپوزیتی نمونه هایی از این مواردند (شکل 7) [2].



شکل 7. کاربردهای PTFE در زمینه های مختلف [2]

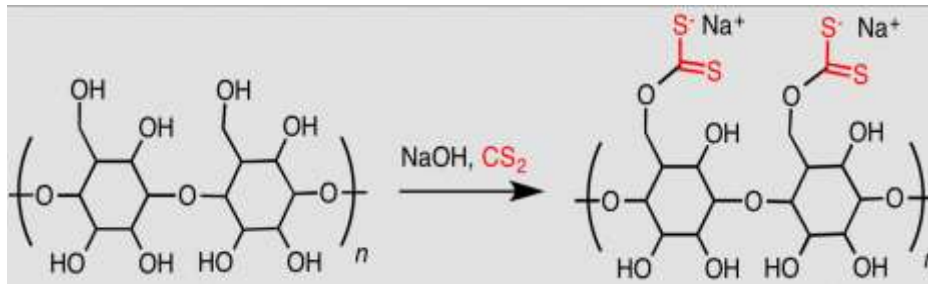
الیاف PTFE

الیاف ساخته شده توسط PTFE دارای ویژگی هایی همچون عدم واکنش پذیری، جذب رطوبت پایین در برابر آب و مایعات ارگانیک، ضریب اصطکاک پایین و خواص الکتریکی فوق العاده است. این خواص نشأت گرفته از ساختار تماماً فلئوره شده $(-CF_2.CF_2-)$ آن ها هست. با این حال، مشخصه عدم واکنش پذیری شیمیایی به دلیل وجود پیوندهای شیمیایی $C-F$ و پایداری حرارتی بالا فرآیند تولید این پلیمر را دشوار نموده است [3]. به طور کلی دو روش اصلی تحت عناوین *matrix-spun* و *paste extruded* به منظور تولید الیاف PTFE در دسترس قرار دارد.

1) روش *matrix-spun*

در روش اول خمیر چوب به وسیله محلول قلیایی بهبود می یابد و گروه های هیدروکسیل سلولز به نمک تبدیل می شوند. سلولز بهبود یافته با دی سولفید کربن (CS_2) ترکیب شده تا گروه های نمک های آلکوکسی به گروه های تیو کربوکسی تبدیل شوند. این گروه ها تحت عنوان زانتات¹ شناخته می شوند (شکل 8) [1].

¹ xanthate



شکل 8. تشکیل گروه‌های زانتات در ساختار سلولز با استفاده از CS_2 در محیط قلیایی

مواد تبدیل‌شده با استفاده از CS_2 یک دوپ¹ ویسکوز است که پس از فرآیند فیلتراسیون به‌طور کامل با PTFE دیسپرس مخلوط می‌شود. مخلوط زانتات و PTFE در یک حمام اسید ریسیده می‌شود. اسید گروه‌های زانتات را به دی سولفید کربن و سلولز تبدیل می‌کند. CS_2 جمع‌آوری و بازیابی می‌شود. الیاف PTFE با آب شستشو داده شده تا اسید و دیگر ناخالصی‌ها حذف گردد. الیاف سپس تحت کشش قرار می‌گیرند تا استحکام آن افزایش یابد. مقدار نهایی استحکام به دست آمده الیاف PTFE در بازه 280-350 MPa قرار دارد که 10 برابر بالاتر از استحکام پودر قالبگیری شده این پلیمر است [1].

یک نمونه از فرآیند تولید نخ PTFE بدین صورت است که محلول ویسکوز شامل 7% سلولز و 6% هیدروکسید سدیم با استفاده از 30% دی سولفید کربن تهیه می‌شود. محلول ویسکوز فیلتراسیون شده و پیش از افزودن مخلوط 60% دیسپرس PTFE شامل 10% ماده تریتون ایکس 100²، به آن زمان داده می‌شود. دوپ ریسندگی³ شامل 40% PTFE و 2.3% سلولز می‌شود. این مخلوط فیلتر شده و در دمای 20°C ریسیده می‌شود. رشته ساز شامل 60 روزنه با قطر 125 μm است. فیلامنت‌ها تهیه شده وارد یک حمام آب محتوی 10% سولفوریک اسید، 16% سدیم سولفات و 10% سولفات روی می‌گردد. پس از عبور از یک متر حمام انعقاد اسیدی، نخ PTFE وارد یک حمام آب گرم با دمای 79°C می‌شود. در ادامه فیلامنت‌ها از یک غلتک حرارتی با دمای 190°C عبور می‌کنند تا خشک شوند. در این مرحله استحکام نخ در حدود 0.04 گرم بر دنیر است. با عبور نخ از یک غلتک حرارتی دیگر با دمای 389°C، سلولز از ساختار لیف حذف می‌شود. نخ خروجی دارای کششی معاد 0.075 گرم بر دنیر خواهد بود. این مقدار 7 برابر بیشتر از مقدار استحکام کششی نخ اولیه است. نخ نهایی دارای 60 فیلامنت و نمره 375 دنیر خواهد بود [1].

الیاف تهیه شده از روش فوق به دلیل وجود کربن باقی مانده ناشی از تخریب سلولز سیاه‌رنگ‌اند. بنابراین نیاز به یک فرآیند سفیدگری به منظور دستیابی به نخ سفید دارند. این

¹ dope

² Triton X-100

³ spinning dope

فرایند با حرارت دهی نخ تا دمای 300°C به مدت 5 روز صورت می‌گیرد. یکی از معایب این روش از دست رفتن نیمی از استحکام نخ است. روش دیگر استفاده از سفیدگری شیمیایی است. در این حالت نخ در سولفوریک اسید غوطه‌ور و جوشانده می‌شود. در محفظه سفیدگری مقدار اندکی نیتریک اسید نیز افزوده می‌شود. مشکل این شیوه تولید مقدار زیادی اسید به صورت ضایعات است [1].

(2) روش **paste extrusion**

در این فرآیند، ابتدا رزین PTFE با یک روان کننده هیدروکربنی با 16 تا 25 درصد وزنی ترکیب شده تا خمیر تهیه شود. این ترکیب درصد بر اساس مشخصات هندسی روزنه رشته ساز انتخاب می‌شود. در مرحله بعد هوای موجود در خمیر حذف می‌شود تا از تشکیل حفره در ساختار خمیر جلوگیری شود. انتخاب نوع روان کننده هیدروکربنی بر اساس خواص فیزیکی و شرایط بهینه فرآیند تولید مانند سطح و مدت زمان فشار اعمال شده به خمیر، ویسکوزیته و کشش سطحی آن صورت می‌گیرد تا توزیع یکنواختی از مایع روان کننده در داخل خمیر به دست آید. این مسئله کمک شایانی در گام بعدی (اکسترود) می‌نماید تا محصولی با خواص مکانیکی مورد قبول به دست آید [5]. خمیر آماده شده به یک سیلندر با فشار پایین (1-3 MPa) تغذیه می‌شود و سپس از روزنه با نرخ ثابت عبور می‌کند. مواد اکسترود شده از یک کوره چندبخشی شامل خشککن و سینترینگ¹ عبور داده می‌شود و در انتها ماده تولیدی خنک می‌گردد [5]. فرآیند سینترینگ شامل حرارت دهی و فشرده سازی مواد در دمایی کمتر از دمای ذوب پلیمر است. به منظور حذف روان کننده از یک حمام حاوی حلال داغ استفاده می‌شود. در شکل‌های (9) یک نمونه اکسترودر افقی به کاررفته به منظور روکش نمودن و عایق بندی سیم فلزی نشان داده شده است [1].

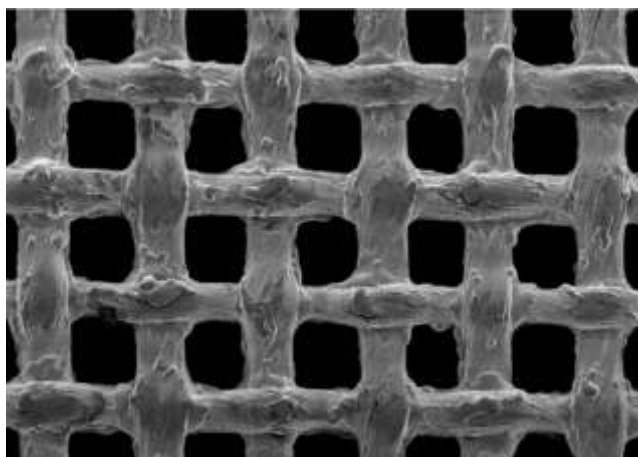


شکل 9. اکسترودر افقی مورد استفاده در روش **paste extrusion** به منظور روکش نمودن سیم فلزی [1]

¹ Sintering

الیاف تهیه شده به روش matrix-spun دارای استحکام بسیار پایین (1-2 g/d)، ناپایداری ابعادی در دمای بالا و جمع شوندگی زیاد (10-20%) است. در مقایسه، الیاف PTFE تهیه شده با استفاده از روش paste extrusion تحت عنوان ePTFE¹ شناخته شده و دارای استحکام بالاتر (بیش از 4 g/d)، جمع شوندگی پایین تر (3-5%) نسبت به روش matrix-spun هستند [6].

به دلیل ضریب اصطکاک ذاتی پایین الیاف ePTFE، منسوجات حاوی این الیاف از ضعف ناپایداری مشهودی رنج می‌برند. این امر در منسوجات حاوی حفرات/فواصل با اندازه نایکخواخت، ثبات سایشی پایین و دارای مشکلات حاد زیردست، مشهودتر است. حل این مسئله با افزودن الیاف بیشتر و درگیر نمودن هرچه بیشتر آن‌ها که منجر به افزایش چگالی منسوج و به طبع افزایش وزن پارچه می‌شود، صورت می‌گیرد. اگرچه، این ویژگی در بسیاری از زمینه‌های کاربردی الیاف ePTFE مانند لایه تقویت‌کننده غشاء فیلتر پارچه که نیاز به خواص حرارتی و شیمیایی بالا دارد، الزامی نیست [6]. به منظور رفع مشکلات فوق روشی توسط شرکت گور و همکاران² ابداع گردید. این روش توسعه یافته با اکستروود نمودن پودر PTFE آغشته به روغن روان کننده آغاز می‌شود. در ادامه، روان کننده با استفاده از حرارت حذف می‌گردد. مواد PTFE سینتر نشده³ در محدوده دمایی 320°C - 35°C حرارت داده می‌شوند تا به منظور کشش در دمای بالا آماده شوند. کشش در دمای 330°C صورت می‌گیرد. الیاف پس از خنک شدن جمع‌آوری می‌شوند [1]. در شکل (10) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی⁴ از یک نمونه پارچه 100% ePTFE تولیدی به روش گور نشان داده شده است. در این تصویر آرایش یافتگی مناسب الیاف در ساختار پارچه به خوبی مشهود است [6].



شکل 10. تصویر SEM از سطح پارچه ساخته شده از الیاف 100% ePTFE

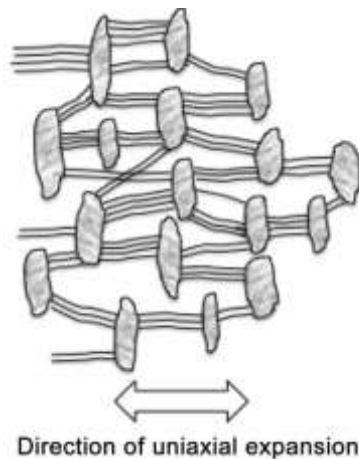
¹ expanded PTFE

² W. L. Gore and Associates

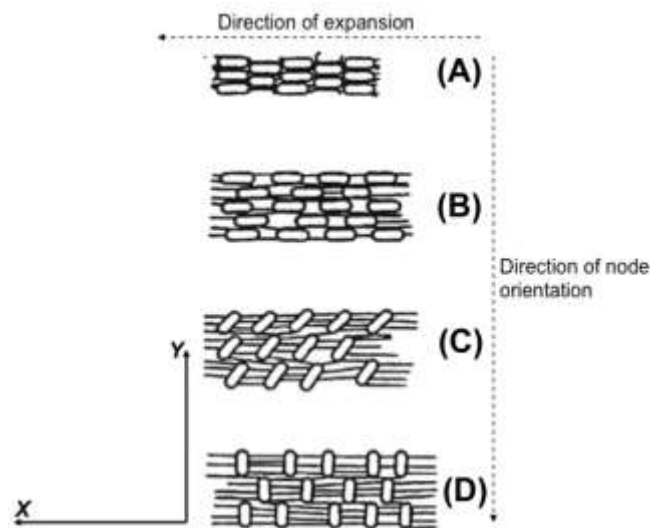
³ unsintered

⁴ Scanning Electron Microscopy (SEM)

کشش اعمال شده روی PTFE می‌تواند به صورت تک و یا چند محوره صورت گیرد (شکل 11). ساختار داخلی PTFE به صورت مجموعه‌ای از اتصالات داخلی (گره‌ها¹) با فیبریل‌ها مشخص می‌شود. این اتصالات در واقع ساختارهایی بی‌نظم، مسطح و جزیره مانند بوده و تحت کشش تغییر جهت یافته و عمود بر راستای آرایش یافتگی فیبریل‌ها قرار می‌گیرند (شکل 12) [1]. فیبریل‌ها می‌توانند سطح مقطعی با قطر $0.1\mu\text{m}$ تا ابعاد قطریک و دو مولکول در محدوده $0.005 - 0.01\mu\text{m}$ بسته به شرایط توسعه ابعادی داشته باشند. شرایط فرآیند کشش طیف گسترده‌ای از دما ($35 - 320\text{ }^\circ\text{C}$) و نسبت کشش ($10-40000\%$) را در برمی‌گیرد [1].



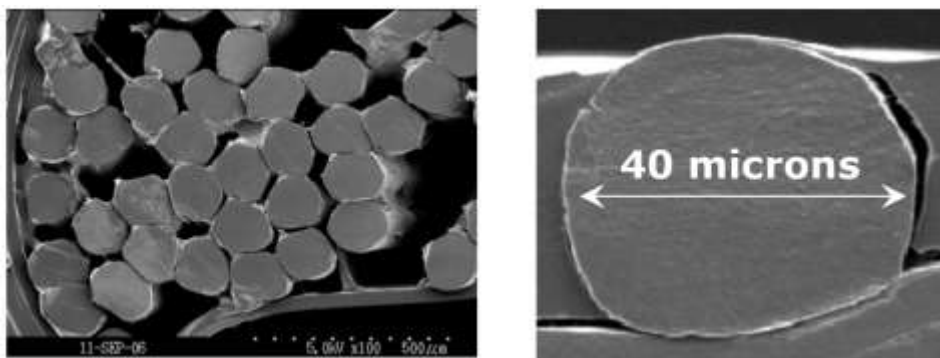
شکل 11. کشش تک‌محوره غشاء ePTFE [1]



شکل 12. شماتیک تغییر ساختار میکرو حفره ای PTFE تحت بارگذاری کشش در راستای محور x [1]

تحقیقات گور منجر به توسعه الیاف ePTFE با چگالی پایین/قطر کم شامل مونوفیلانته‌های با سطح مقطع مدور با قطر 50 میکرون گردید. این اندازه کمتر از نصف قطر تار موی انسان است (شکل 13) [6].

¹ nodes



شکل 13. سطح مقطع فیلامنت الیاف ePTFE تهیه شده با استفاده از روش گور [6]

در جدول 3 مشخصات الیاف PTFE، PVF، PVDF و FEP با امکان استفاده به دو صورت فیلامنت و بریده (staple) ارائه و با شده است. این الیاف دارای مقاومت حرارتی (دمای بیش از 100 °C) و شیمیایی محیطی بالایی است. از نتایج جدول 3 مشخص گردید الیاف PTFE دارای بالاترین دمای ذوب (T_m) در مقایسه با دیگر الیاف است. این امر می‌تواند ناشی از واکنش ناپذیری ذاتی PTFE به دلیل در اختیار داشتن مزیت حضور اتم‌های فلئور در مقادیر بالا باشد. در نتیجه چگالی پیوندهای قطبی C-F و نظم ساختاری بالا، پلیمر PTFE در برابر عوامل شیمیایی و حرارتی مقاومت بیشتری نشان می‌دهد [4].

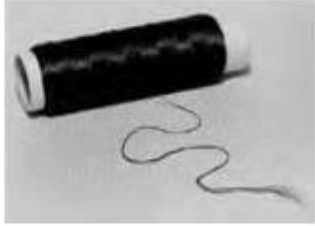


جدول 3. مشخصات الیاف فلئوره پیوسته تولید شده از پلیمرهای مقاوم در برابر عوامل شیمیایی [4]

Genus	Example	Manufacturer	Tenacity, N/tex	Breaking strain, %	T_m , °C	T_s , °C	Max. temp. usage, °C	LOI, % O ₂
PTFE	Teflon	Du Pont	0.14	20	347	177	290	98
	PTFE	Lenzing	0.08-0.13	25	327	200	280	98
	PTFE	Albany	0.13	50	375	93	260	98
PVF			0.19-0.39	15-30	170	100	150	—
PVDF	Kynar	Albany	0.43	25	156	100	149	44
	Solef	Solvay	—	40	178	150	160	—
	Trofil	Dynamit	—	10-50	165	—	120	—
FEP	Halar-ECTFE	Albany	0.3	25	241	149	180	48
	Teflon-FEP	Du Pont	0.05	50-60	290	—	—	—
	Tefzel-ETFE	Albany	0.3	25	271	177	195	—

Notes: T_m is the melting temperature and T_s is the shrinkage temperature; LOI is the limiting oxygen index.

الیاف PTFE توسط شرکت DuPont با استفاده از اکسترودر سوسپانسیون پلیمری فیبری در یک دوپ ویسکوز (سلولز) و انجام فرآیند استرینگ در دمای بالا تولید گردید تا ساختاری پیوسته و یکنواخت ایجاد شود. با این حال، حضور سلولز سوخته به الیاف، رنگی قهوه‌ای می‌دهد. در شکل (14) این محصولات با

سه شکل فلاک¹، الیاف بریده و فیلامنت با ویژگی‌های هر یک ارائه شده است [4].

Form	Image	Characteristics and uses
Continuous filament yarn		<ul style="list-style-type: none"> • Low coefficient of friction • High thermal and chemical resistance • Woven fabrics / tubes • Knitted fabrics / tubes • Combination with other yarns
Staple		<ul style="list-style-type: none"> • High thermal and chemical resistance • Low coefficient of friction • Used for needle-felting • Hot gas filtration • Low friction / high temperature resistant parts in office equipment • Performance enhancement in blends with other fibres
Floc		<ul style="list-style-type: none"> • Low coefficient of friction • Blends / compounds with other polymers for moulding • High chemical resistance for chlor-alkali electrolysis

شکل 14. پلیمر PTFE تولید شده توسط شرکت DuPont به شکل‌های مختلف تحت نام تجاری تفلون [4]

منابع

[1] Ebnesajjad, S., Fluoroplastics, Volume 1: Non-Melt Processible Fluoropolymers - The Definitive User's Guide and Data Book. 2014: Elsevier Science.

[2] Dhanumalayan, E. and G.M. Joshi, Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE). Advanced Composites and Hybrid Materials, 2018: p. 1:247–268.

[3] Clarence, B., Method of preparation of filaments from polytetrafluoroethylene emulsion. 1964, Google Patents.

[4] Hearle, J.W., High-performance fibres. 2001: Elsevier.

[5] Ochoa, I. and S.G. Hatzikiriakos, Paste extrusion of polytetrafluoroethylene (PTFE): Surface tension and viscosity effects. Powder Technology, 2005. 153(2): p. 108-118.

¹ Floc

[6] Clough, N.E. and W.L.G. Associates, Innovations in ePTFE Fiber Technology : New Capabilities, New Applications, New Opportunities. 2009.