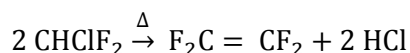


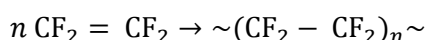
## 7. A teflon

A fluortartalmú műanyagok csoportjának legfontosabb tagja a poli(tetrafluor-etilén) vagy röviden PTFE, közismertebb nevén teflon. Felfedezésének története igen érdekes. Az 1930-as években a Du Pont cég megbízásából R. J. Plunkett vegyész a fluortartalmú szerves vegyületek kutatásával foglalkozott. A munkájában használt tetrafluor-etilén spontán polimerizálódott a vegyész meglepetésére. Pár évvel később a Du Pont cég megkezdte a Teflon márkanévű PTFE nagyüzemi gyártását általános ipari célokra.

Tetrafluor-etilénből gyökös polimerizációval, szuszpenziós vagy emulziós eljárással készül. A tetrafluor-etilén monomer széles koncentrációtartományban gyúlékony, emellett potenciálisan robbanékony. Inhibitor hiányában spontán polimerizációra és dimerizációra hajlamos, amit aktív szennyező anyagok (például oxigén) is iniciálhatnak. Az ezekkel a reakciókkal járó nyomásnövekedés okozhatja a robbanást zárt tartályban. A tetrafluor-etilén önmagában nem jelent nagy akut mérgezési veszélyt. Sokkal veszélyesebb a polimerizációja során keletkező kevés oktafluor-izobutilén, emiatt a polimerizáló berendezést teljesen zárttá kell tenni. A kész PTFE polimernek káros környezeti hatása már nincs. Tetrafluor-etilént klór-difluor-metán termolízisével állítanak elő.



A klór-difluor-metánt egy korrózióálló anyagból (például platina) készült, 600-800°C-ra hevített csövön vezetik át. Nagy szelektivitás elérése céljából korlátozott (kb. 25%) konverziót alkalmaznak. Nagyobb (kb. 65%) konverzió esetén a klór-difluor-metánt vízgőzzel vagy szén-dioxiddal elegyítik. Így a szelektivitás a tetrafluor-etilénre kb. 90%-os. A reakció során melléktermékek is keletkeznek: hexafluor-propén, lineáris és ciklikus perfluor- és klórfuorvegyületek. A tetrafluor-etilén oxigén jelenlétében spontán polimerizációra hajlamos, ezért alacsony hőmérsékleten, oxigén kizárásával és stabilizátor (dipentén vagy tri-*n*-butilamin) hozzáadásával tárolandó. Nagy tisztaságú TFE-t használnak hőálló és kémiai ellenálló polimerek előállítására. A TFE-t az iniciátort (például ammónium-peroxo-diszulfát) tartalmazó vízbe vezetik egy ezüsttel bevont reaktorban és egy óráig 80°C-on kevertetik a PTFE előállításához.



Kétféle eljárást is alkalmaznak. A szuszpenziós polimerizáció (nagy molekulatömegű) PTFE-szemcsék szuszpenzióját eredményezi. A szemcsék őrlésével finom porokat állítanak elő, amelyeket nagyobb részecskékre agglomerálnak, hogy jobb folyást biztosítsanak. A port

rudakká öntik extrudálás és hevítés céljából, hogy a részecskék összetapadjanak. Az emulziós polimerizáció pedig (kisebb molekulatömegű) PTFE-részecskék kolloid diszperzióját eredményezi. A diszperzió koagulálható és finom porrá szárítható, amiből pasztát készítenek és egy huzalra extrudálják.

A PTFE-molekula elágazás nélküli láncmolekula. A polimer szemikristályos szerkezetű, lágy, hajlékony, zsíros tapintású, fehér, átlátszatlan, rendkívüli tulajdonságokkal rendelkező műanyag. A fluoropolimerek közül a legkorábban (1940-es évek) a PTFE gyártása kezdődött meg, ipari jelentősége és felhasználása nagyobb, mint az összes többi fluoropolimeré együttvéve.

A PTFE még nagyobb elterjedését kitűnő tulajdonságai ellenére viszonylag magas ára és különleges feldolgozási eljárásai gátolják. A PTFE hőre lágyuló, nagymértékben kristályos szerkezetű polimer, amelynek kristályos olvadáspontja  $327^{\circ}\text{C}$ , de ezen a hőmérsékleten az anyag viszkozitása olyan nagy, hogy nem ömlik meg, csak áttetsző anyaggá alakul, így megtartja bizonyos mértékben szilárdságát és alakját. Ha a hőmérsékletet addig emelnénk, hogy ömledékét a hagyományos módszerekkel is feldolgozhassuk, a polimer elbomlana ( $400^{\circ}\text{C}$  felett). A PTFE kristályszerkezete  $19^{\circ}\text{C}$ -on reverzibilisen átrendeződik, átkristályosodik. Feldolgozásakor lehűtésének módja és sebessége erősen befolyásolja a polimer kristályossági fokát, így tulajdonságait is. Ha a polimert gyorsan hűtjük le szerkezetének 40-50%-a lesz kristályos, lassú lehűtésnél 60-75%-a, ideális esetben akár 95%-a. A kristályosság mértékének megállapítására a legegyszerűbb mód a sűrűségmérés, hiszen tudjuk, hogy a 100%-osan kristályos PTFE sűrűsége  $25^{\circ}\text{C}$ -on  $2,302\text{ g/cm}^3$ , míg az amorfé  $2,00\text{ g/cm}^3$ .

A PTFE rengeteg előnyös tulajdonsággal rendelkezik. Vegyszerállósága kiemelkedően jó, az összes ismert műanyag közül a legjobb. Kitűnő hőállóságának és hidegállóságának köszönhetően széles hőmérséklet tartományban ( $-269^{\circ}\text{C}$ -tól  $+260^{\circ}\text{C}$ -ig) tartósan igénybe vehető. Rendkívül jó villamos és dielektromos jellemzői frekvenciától és hőmérséklettől szinte teljesen függetlenek. A PTFE súrlódása nagyon jó, ezért más műanyagokhoz is adagolják a súrlódási tulajdonságok javításához. Súrlódási együtthatója a terheléssel eleinte gyorsan csökken, majd állandósul, viszont a csúszási sebességgel éppen fordítva változik. A legkevésbé éghető műanyag, az égést nem táplálja és izzítása során a fejlődő füst sűrűsége és a mérgező gázok koncentrációja is kicsi. A tiszta oxigén csak nagy hőmérsékleten és nyomáson tudja megtámadni.  $-200^{\circ}\text{C}$ -ig megőrzi szívósságát és ütésállóságát. Váltakozó igénybevételnek, hajlítgatásnak és az időjárás változásainak jól ellenáll. Semmiféle anyag sem tapad rá, vízfelvétele és gázáteresztő képessége kicsi. Ez utóbbi függ a hőmérséklettől, a PTFE kristályossági fokától és a gyártási mód szerint változó porozitásától. További

előnyös tulajdonsága, hogy kielégíti a legszigorúbb élelmiszeripari és gyógyászati követelményeket, szövetbarát és állatokkal megetetve károsodást nem okoz.

Felsorolt számtalan előnyös tulajdonsága mellett hátrányokkal is rendelkezik. Drága, nem átlátszó, fényáteresztő képessége a vastagsággal rohamosan csökken, nem rugalmas, kopásállósága gyenge, keménysége és karcállósága kicsi. Az ionizáló sugárzás szempontjából egyike a legkevésbé ellenálló műanyagoknak. Hővezető képessége kicsi, hőtágulása a többi műanyaghoz képest is nagy. Szakító- és nyomószilárdsága, merevsége átlagon aluli. Továbbá a PTFE csak különleges eljárásokkal dolgozható fel. Hátrányos tulajdonságainak egy része adalékanyagokkal (például üvegszál, kokszipor, grafit, molibdén-szulfid, bronzpor) javítható.

A PTFE időjárás-állósága kitűnő. Szélsőséges időjárási viszonyok között több évig használt termékek esetében sem lehetett elváltozást vagy károsodást kimutatni, így stabilizátorok bekeverésére sincs szükség. Sőt mikroorganizmusok és gombák sem tudják megtámadni. Ionizáló sugárzásra viszont érzékeny és ennek hatására megindul a lánctördelődés, ami a tulajdonságok romlásával jár.

A PTFE a legjobb vegyszerállóságú műanyag. Kisebb hőmérsékleten semmiféle vegyszer nem képes megtámadni és nagy hőmérsékleten is csak kevés vegyszer tudja károsítani. Az alkálifémek ömledéke vagy oldata barna elszíneződést okoz a felületén, ezért ezt a reakciót a PTFE felületének ragaszthatóvá tételére is használják. Nagy hőmérsékleten és nyomáson az elemi klór és fluor, illetve az alkálifémek oxidjai és karbonátjai reakcióba lépnek a PTFE-vel. Az alkálifémek vegyületeivel 350°C felett stabil vegyületeket is alkot. A gáz és a folyékony halmazállapotú oxigénnek is ellenáll. Kísérletek bizonyítják, hogy egy év alatt 100°C-on a sósav, a salétromsav, a kénsav, a nátrium-hidroxid és az ammónium-hidroxid semmilyen koncentrációban sem okozott kimutatható elváltozást. A PTFE-hez hasonló kémiai felépítésű fluortartalmú szénhidrogének már szobahőmérsékleten is károsítják a polimert abszorpciójukkal. Ezek az anyagok nagy hőmérsékleten feszültségkorróziós repedést okozhatnak.

A PTFE nem dolgozható fel hagyományos módszerekkel, ezért a fémeknél alkalmazott porkohászati eljárásokhoz hasonló módszerekkel kell eljárni. A különleges, ennek ellenére nem bonyolult módszerekhez szükséges berendezéseket viszont nem gazdaságos a felhasználóknak beszerezniük. Ez az oka, hogy a PTFE jelentős részét félkész termékek (lapok, rudak, csövek, fóliák) formájában forgalmazzák, amelyekből a felhasználó forgácsolással állítja elő a szükséges formadarabokat. A bevonatok kialakítására szolgáló PTFE-diszperziókat a felhasználók a saját berendezéseikkel hordják fel. A porból kiinduló feldolgozási eljárásoknál fontos, hogy az elektrosztatikus feltöltődésre nagymértékben

hajlamos por ne kössön meg szennyeződéseket felületére. Ennek elkerülése végett szűrt levegőben dolgoznak. Az ilyen munkahelyeken tilos a dohányzás és a nyílt láng használata, mert a PTFE nagy hőmérsékleten fluortartalmú gázok fejlődése közben bomlik. A megfelelő szellőzésre és a helyi elszívásra különös figyelmet kell fordítani.

A PTFE nem vesz fel vizet, ezért előszárításra nincs szükség, kivéve, ha helytelen tárolás miatt pára csapódott le az anyag felületére. Utóhőkezelésre sincs szükség a félkész termékek vagy a belőlük forgácsolással előállított formadarabok esetében, viszont még korábban, az alakadást követően kell hőkezelni. Színezhetőségét illetően a PTFE-hez csak olyan, általában szervesetlen pigmentek adagolhatók, amelyek minimum 270°C-ig tartósan hőállóak. A porokhoz a pigmentet gyorskeverővel vagy fluidizáló keverővel szárazon is hozzákeverhetjük. Ha a feldolgozáshoz először pasztásítani kell, akkor a színezéket érdemes először a pasztásítószerrel gyorskeverővel összekeverni, a jobb pigmenteloszlás érdekében ionmentes emulgeátort is adagolunk hozzá, majd jól elkeverjük a PTFE-porral. A PTFE-diszperziókat állandó keverés közben lassan és fokozatosan adagolt különleges színezőszuszpenziókkal színezik. A tiszta, speciális berendezésekkel nagyon apró szemcseméretre megőrölt PTFE-hulladék az eredeti porhoz keverve szinterezéssel vagy ramextruderen újra feldolgozható. Viszont a hulladék bizonyos mértékű szennyeződését nem lehet elkerülni, ezért az ilyen anyagot villamosipari célokra ne használjuk. Hegeszthetőségét tekintve a nagyon vékony fóliák 380-390°C-on és 2-3 bar nyomással hegeszthetők. Ezzel szemben a vastagabb termékek nem hegeszthetők, ez viszont más hőre lágyuló fluropolimerekből kialakított közvetítőréteggel már megoldható. A PTFE csak különleges felület-előkészítés után ragasztható rendkívüli vegyszerállósága és antiadhéziós jellege miatt. A ragasztandó felületek kémiai összetételének megváltoztatásával aktiválhatjuk a polimert. Ezt ionizáló sugárzással vagy általában vegyszeres maratással végzik. Leggyakrabban folyékony ammóniában oldott fémnátriumot vagy tetrahidrofuranban oldott naftil-nátriumot használnak. Az aktivált felületek fényérzékenyek, ezért a ragasztást minél rövidebb időn belül kell elvégezni. Mindkét aktiválási módszer rendkívül balesetveszélyes. Az aktivált felületek kerámiához epoxi alapú, fémekhez epoxi- és fenol-rezorcín-alapú ragasztókkal köthetők, a PTFE önmagához még poliuretán- és poliamid alapú ragasztókkal is ragasztható. A ragasztott termékek tulajdonságait a ragasztó tulajdonságai befolyásolják.

A PTFE-lemezek magas hőmérsékleten nyomással jól alakíthatók, formázhatók, és ha az ilyen termékeket újra felhevítjük, azok nagyrészt visszanyerik eredeti alakjukat. A PTFE esetében is a műanyagok forgácsolására általánosan érvényes szabályokat kell betartani. Puhasága miatt óvatosan kell befogni a munkadarabokat. Rossz hővezetőképessége miatt pedig a forgácsoláskor keletkezett hő hűtőfolyadékkal kell elvezetni, de ezt már éles, finoman megmunkált szerszámok alkalmazásával is csökkenthetjük. Nagyobb

méretpontosságú termékek készítésekor figyelembe kell venni a hőtágulást, a 19°C-os átkristályosodást és a fém mérőeszközök általi lehetséges deformációt. Közöséges PTFE-hez gyorsacél, töltött típusokhoz keményfém vagy kerámialapkás szerszámokat használunk.

A PTFE félkész termékek egyik, szakaszos előállítási módja a szinterezés. A kifejlesztett különböző szinterezési módszerek közül egy adott célra a műszaki tényezők mellett a gazdasági szempontok figyelembevételével kell a legmegfelelőbbet kiválasztani. A szinterezés a PTFE legtöbb más feldolgozási módjában is fontos szerepet játszik, mint a technológia utolsó lépéseinek egyike. Az előformált termékek szinterezése a legegyszerűbb, a legolcsóbb és a legelterjedtebb eljárás. A PTFE-port acélszerszámban nagy nyomáson a kívánt formára sajtolják, majd a szerszámból kivett előgyártmányt nagy hőmérsékletre hevítve szinterezik. Ezt az eljárást egyszerű geometriájú termékek, lapok, rudak és csövek készítésére használják, méreteiket a présgép korlátozza. Az így előállított termékek pórusossága a legnagyobb, fásasztással szembeni ellenállása a legkisebb. A nyomás alatti szinterezés lényegesen drágább, így ezt csak olyan esetekben használják, amikor a termékekre vonatkozó műszaki követelmények miatt szükséges. Az így előállított formadarabok porozitása kisebb, szilárdsága nagyobb, fásasztással, hajtogatással szembeni ellenálló képessége jobb, mint a nyomás nélküli szinterezés esetén. A különbség az, hogy az összepréselt előgyártmányt nem veszik ki a szerszámból, hanem vagy nyomás alatt a fűthető szerszámban szinterezik és hűtik le, vagy pedig a nyomás megszüntetése után szerszámostul áteszik egy szinterezőkemencébe, ahol az előformázásnál kisebb nyomáson szinterezik és hűtik. Az így kapott termékek színe sötétebb. Közöséges sajtolással előállított termékeknél a PTFE-por sajátosságai miatt a termékek tulajdonságai a sajtolás irányától függően eltérőek és vékony falú, bonyolult geometriájú formadarabokat nem lehet előállítani. Izosztatikus nyomással formált termékeknél a PTFE-port rugalmas membránnal választjuk el a folyadékburoktól és a folyadékot nyomás alá helyezzük, ekkor a port minden irányból egyforma sajtolóerővel tömöríthetjük és az így készült terméket szinterezzük.

A PTFE folyamatos feldolgozása különleges extrúziós módszerekkel oldható meg. Az egyik módszer, a ram-extrúzió folyamatos eljárás, melynek során PTFE-porból vagy töltőanyagot is tartalmazó porkeverékből bármilyen hosszú csöveket, profilokat és lemezeket állítanak elő. A másik módszer, a paszta-extrúzió szakaszos eljárás, melynek során egy általában 5-30 kg tömegű, pasztásítószerrel elegyített PTFE előgyártmányt megfelelő geometriájú szalagokká, huzalbevonatokká vagy csövekké sajtolnak ki.

A PTFE-bevonatok kialakításához különböző összetételű vizes PTFE-diszperziókat használnak. A különböző bevonandó vagy impregnálandó felületek különböző előkezelést igényelnek. A PTFE-diszperziókkal nagy hőállóságú szálakat és a belőlük készült

szöveteket, fonatokat, paplanokat és zsinórokat szokták impregnálni. Az így előállított termékek súrlódási tulajdonságai kitűnőek, szennyeződések és más anyagok nem tapadnak rájuk, hidrofóbok és nagy hőmérsékleten is jó vegyszerállóságúak, tehát a PTFE számos előnyös tulajdonságával rendelkeznek, viszont mechanikai szilárdságuk sokkal jobb, mint a PTFE-é.

A PTFE alkalmazása széles körű. A gépiparban kitűnő súrlódási tulajdonságát, nagy hő- és hidegállóságát, valamint vegyszerállóságát használják ki. Megfelelő konstrukciókkal hátrányos tulajdonságai pedig nem is jelentkeznek. Fő felhasználási területei a gépiparban az önkenő csapágyak és csúszófelületek, építőipari szerkezetek (siklófelületek), dugattyúgyűrűk és pakolások, tömítések különleges igénybevételek esetén és szállítószalagok.

A vegyiparban és az élelmiszeriparban rendkívüli vegyszerállóságát és hőállóságát használják ki. Megfelelő konstrukcióval több száz bar nyomáson is használható. A vegyiparban tömítésekhez, tömítőszalagokhoz, zsinórokhoz, pasztákhoz, csőkompenzátorokhoz, csövekhez, csőszerelvényekhez, tömlőkhöz, tartályok és desztillálóoszlopok korrózióálló béléséhez, kolonnatöltetekhez alkalmazzák. Továbbá laboratóriumi eszközök, poharak, téglék, különféle csapok, tömítések (a csapzsír nélküli szerkezetekhez), mérőszondák, mágneses keverők forgótestének, töltőegységek, keverők, rázógépek bevonatának anyaga. Az élelmiszeriparban tésztagyűrű és dagasztó berendezések, csokoládéöntő formák, sütőformák, keverők és szállítócsigák bevonatainak anyaga. A gumiparban és a papírpárban is használnak PTFE formatesteket, bevonatokat és béleléseket.

A PTFE kitűnő, a hőmérséklettől és a frekvenciától szinte független villamos tulajdonságai, hőállósága, kicsi vízfelvétele és további számos előnyös tulajdonsága miatt a villamosipar számára sok területen nélkülözhetetlen anyaggá vált. PTFE-fóliákkal szigetelnek villamos motorokat és transzformátorokat. További PTFE-szigetelések: huzalok, áramkivezetések, generátorok horonyszigetelése. Repülőgépek, űrtechnikai eszközök villamos berendezéseikhez vékony, könnyű PTFE-szigeteléseket használnak, amelyek a világűr körülményeinek és a repülés során fellépő igénybevételek követelményeinek megfelelnek. Hajók és tengeralattjárók huzal- és kábelszigeteléseikhez azért célszerű, mert vízálló és a zárt térben rendkívül veszélyes tüzeseteknél a belőle fejlődő füst kis sűrűségű és a mérgező gázok koncentrációja is kicsi. Az elektronikai iparban pedig jó dielektromos tulajdonságai miatt használják.

Egyéb felhasználási területei közül az egyik legismertebb a háztartási eszközök bevonata, például főzőedények, serpenyők, torta- és süteményformák, grillsütők és pirítók, vasalók és

tésztagyúró eszközök csúszófelülete. A műanyagiparban például poliuretánhabok, epoxigyanták és más műanyagok öntőformáinak bevonata. A csomagolástechnikában, a textiliparban, a hűtőiparban és még sok más területen is elterjedten használnak PTFE-ből készült termékeket, bevonatokat. A kis molekulatömegű PTFE-mikroporok más műszaki műanyagokhoz keverve javítják azok súrlódási jellemzőit, tintákba keverve antiblokkoló hatást fejtenek ki, lakkokba és festékekbe keverve növelik a bevonat kopásállóságát, fluorozott szénhidrogénekkel elegyítve szórópalackokkal felhordható formaleválasztó, tapadáscsökkentő szerek készülnek belőlük. Goretex márkanév alatt közismertté vált mikrofibrilláris PTFE-szálakat például mesterséges vérerek készítésére használják.

A PTFE szinterporok és pasztásítható porok formájában, vizes diszperziókként és mikroporokként kerül forgalomba. A diszperziók kivételével a legtöbb végfelhasználó nem eredeti, hanem félkész termékkel feldolgozott formájában dolgozza fel, ezért igen jelentős a PTFE félkész termékek (csövek, lapok, tömbök, fóliák, zsinórok, paszták) forgalma. Számos vállalat – például Magyarországon a PEMÜ, Pemüflon márkanéven – PTFE-t nem állít elő, csak az ilyen félkész termékek készítésével foglalkozik.

## Irodalomjegyzék

K. Weissermel, H. J. Arpe: Ipari szerves kémia, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1994

Dr. Macskásy Hugó: A műanyagok világa, Műanyagipari Kutató Intézet, Budapest, 1983

Dr. Kovács Lajos: Műanyag zsebkönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979

Dr. Füzes László, Dr. Kelemen Andorné: Műszaki műanyagok zsebkönyve, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1989

Farkas Ferenc: A műanyagok és a környezet, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2000

<https://scienceinfo.com/teflon-polytetrafluoroethylene/#synthesis-of-polytetrafluoroethylene>

<https://orioncoat.com/blog/how-is-ptfe-teflon-made/>

<https://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polytetrafluoroethene.html>