

Biztosítani kell a nélkülözhetetlen fluorvegyületek fenntarthatóságát – Párbeszéd a per-és polifluorozott vegyszerekről

Az egészséget és a környezetet különösen veszélyeztető vegyi anyagok közül az utóbbi években a per- és polifluorozott anyagok (PFAS) egyre hevesebb vitatémává váltak. Az EU hatályos távlati terve figyelembe veszi a vegyi anyagok meghatározó szerepét az emberi jólét biztosításában, valamint a gazdaság és a társadalom zöld és digitális átállásában. Az egészségre és a környezetre káros anyagok használatának korlátozása mellett a nélkülözhetetlen fluorpolimerek értékláncának létrehozásában legfontosabb érdek és felelősség a fluortartalmú termék gyártásakor és elhasználódásakor a fluoremisszió elkerüléséről való gondoskodás.

Tárgyszavak: PFAS anyagok hatósági háttere, vegyi anyagok címkézése, polifluorozott vegyületek terjedése, fluorpolimerek biztonságos gyártása és ártalmatlanítása

Az Európai Unió vegyi anyagokra vonatkozó fenntarthatósági stratégiája (Chemicals Strategy for Sustainability) a PFAS-anyagokat is felülvizsgálja. A cél, hogy fokozatosan kivonásra kerüljenek az uniós forgalmazásból, és csak abban az esetben engedélyezzék használatukat, ha bizonyítottan pótolhatatlanok és nélkülözhetetlenek. Az EU veszélyes anyagokról szóló működési terve fellendíti a biztonságos és fenntartható innovációt, javítja az emberi egészség és a környezet védelmét a veszélyes vegyi anyagokkal szemben. A vegyi anyagokra vonatkozó távlati terv teljes mértékben figyelembe veszi azok alapvető szerepét az emberi jólét biztosításában, valamint az európai gazdaság és társadalom zöld és digitális átállásában. Ugyanakkor elismeri, hogy sürgősen foglalkozni kell a legkárosabb vegyszerek egészségre és a környezetre gyakorolt hatásaival.

A stratégia ebben a szellemben konkrét intézkedéseket vázol fel a vegyi anyagok biztonságosságának és fenntarthatóságának jóváhagyására, hogy azok előnyeit a bolygónk és az emberi egészség károsítása nélkül hosszú távon élvezhessük. A távlati terv korlátozza az emberi egészségre és a környezetre leginkább káros anyagok használatát, különös szigorral a fogyasztási cikkek és a legveszélyeztetettebb csoportok tekintetében, ugyanakkor a veszélyes típusok esetében előrevetíti a biztonságosabb és fenntarthatóbb változatot.

Az egészséget és a környezetet különösen veszélyeztető vegyi anyagok közül az utóbbi években az „Örök vegyi anyagoknak” becézett per- és polifluorozott anyagok (PFAS), vegyületek egyre hevesebb vitatémává váltak. Ez az anyagcsoport több mint 4700 olyan vegyületet foglal magában, amelyek klór, bróm, jód (Cl, Br, I) atomok nélkül legalább egy perfluorozott metilcsoportot ($-CF_3$), vagy legalább egy perfluorozott metilén-csoportot ($-CF_2-$) tartalmaznak. A természetben nem fordulnak elő, szintetikusán is csak az 1940-es évek óta állítják elő. Kémiaiilag a szerves vegyületek különböző hosszúságú szénláncokból állnak, amelyekben a hidrogénatomokat teljesen (perfluorozott), vagy részlegesen (polifluorozott) fluoratomok helyettesítik. A PFAS anyagokat rövid és hosszú láncú vegyületekre osztják. A rövid szénláncú molekulák rendkívül hosszú

élettartamúak, a vízben és levegőben keresztül rövid idő alatt szétoszlanak a légkörben. A hosszú szénatomláncú vegyületek perzisztensek, könnyen felhalmozódnak a környezetben, valamint az emberi és állati szövetekben. Mérhető veszélyes szintet találtak élelmiszerekben, különösen a halakban, a húsokban és az azokból készült készítményekben.

Leggyakoribb PFAS vegyületek a 8 szénatomszámú perfluorozott karbonsavak: a perfluor-oktánsav (PFOA) és a perfluor-oktánszulfonsav (PFOS). A legmagasabb PFAS szennyezést 1986-ban mutatták ki, míg a 2020-as években regisztrált szennyezettség mértéke a PFOA esetében a korábbi magas érték 10%-a, a PFOS-nál pedig 30%-a volt. A kedvező csökkenő tendencia azonban nem megnyugtató a környezetet és az egészséget súlyosan veszélyeztető PFAS vegyületek tekintetében.

Kezdetben a hivatalos fórumok csak azokat a PFAS vegyületeket szabályozták, amelyeket a legmagasabb koncentrációban mutattak ki a környezetben, és amelyeknek a környezetre, vagy az emberi egészségre gyakorolt hatása indokolt volt. Az évek során egyre több bizonyíték állt rendelkezésre az egész PFAS vegyületcsoport környezetvédelmi szempontból aggályossá nyilvánítására. Ezért a hatóságok több EU tagország egyhangú véleménye alapján komolyabban mérlegelték az összes PFAS vegyületre vonatkozó betiltás felülvizsgálatát. Korábban azért gondolták, hogy a PFAS vegyületeknek nincs káros hatásuk, mert azt feltételezték, hogy ezek az anyagok nem tudnak beleoldódni a környezet különböző rendszereibe. Egy beható amerikai kutatás során azonban kiderült, hogy a megvizsgált minták (főleg élelmiszerek és élelmiszerekkel érintkező csomagolóanyagok) egyharmada tartalmazott fluor atomokat.

A per-és polifluorozott anyagokkal kapcsolatos hatósági háttér

A hatóságok további intézkedéseket sürgettek ezen anyagok vagy más PFAS vegyületek egészségügyi hatásaira vonatkozó új megállapítások figyelembevételére és a lakosság egészségének megóvása érdekében.

- Az Európai Parlament és az Európai Tanács 2006. december 18-án fogadta el a vegyi anyagok regisztrálását, értékelését, engedélyezését és korlátozását szabályozó 1907/2006/EK rendeletet. A **REACH** (Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of **C**hemicals) jogszabály 2007. június 1-jén lépett hatályba, rendelkezései az EU valamennyi tagállamában kötelező érvényűek. Még az EU REACH rendelet hatálybalépése előtt döntés született a PFOS (perfluor-oktánszulfonsav) EU-szerte történő betiltásáról (2006/122/EG irányelv).
- A PFOS-ról hozott 2006-os határozatot ezt követően beépítették az EU POP (Persistent Organic Pollutants) rendeletébe a 2009-es nemzetközi Stockholmi Egyezmény [VO (EU) 757/2010] dekrétum elfogadása érdekében. Ezért a PFOS-REACH bejegyzést törölték (207/2011-es EU rendelet). 2019-ben újra megvizsgálták a Stockholmi Egyezmény szerinti PFOS-tilalmat a teherautók kerekei között kiszökő permetköd visszaszorítására szolgáló berendezés nem dekoratív krómozásához használt zárt rendszerű PFOS felhasználása miatt.
- 2020. július 4-től hatályossá vált a **Stockholmi Egyezmény PFOA-tilalom** az EU POP (Persistent Organic Pollutants) korlátozásokkal.
- A német hatóságok és a norvég törvényhozás együttműködő kezdeményezésére az egész EU-ban szabályozták a per- és polifluorozott vegyszerek (PFAS) között a különösen meghatározó PFOA (perfluor-oktánsav) vegyi anyagokat, beleértve azok sóit és prekursor-vegyületeit is. Ezt a korlátozást több szakaszban (2020 júliusa és 2032 júliusa között)

tervezték a különböző alkalmazások területén, a megfelelő alternatívákra való átállás biztosításával. Vannak azonban olyan, a tiltás alól kivételt képező felhasználási típusok, mint például a beültethető orvostechikai eszközök, tűzoltó habok, fényképezési bevonatok és fotolitográfiai eljárások, amelyeknél nem állnak rendelkezésre helyettesítésre megfelelő lehetőségek. Szigorúan meghatározott feltételek betartása mellett ezért 2025. július 4-ig engedélyezték a PFOA alkalmazását tűzoltóhabokban, azonban 2023 januárjától csak szabadtéri felhasználásra, valamint figyelmeztetéssel a perfluor-hexanszulfonsav Stockholmi Egyezmény rendeletkörébe való bejegyzés folyamatban lévő előkészítésére.

A hatályos jogszabályok alapján az **European Chemicals Agency (ECHA)** – Európai Vegyipari Ügynökség a REACH rendelkezései szerint a vegyi anyagok biztonságos használatát hivatott előmozdítani. Az ügynökség a vegyi anyagokról szóló, áttörést jelentő uniós jogszabályok betartásának biztosításával az emberi egészség, a környezet, valamint az európai innováció és versenyképesség javát szolgálja.

- Segít a vállalatoknak, hogy be tudják tartani a vegyi anyagokra vagy biocidokra vonatkozó konkrét uniós jogszabályokat.
- Együttműködik a nemzetközi szervezetekkel és érdekelt felekkel a vegyi anyagok biztonságos használatának előmozdítása terén.
- Információkkal szolgál a vegyi anyagokról és azok biztonságos használatáról (ehhez egy ingyenes adatbázist bocsát rendelkezésre).
- Együttműködik az Európai Bizottsággal és a tagállami kormányokkal az aggodalomra okot adó vegyi anyagok beazonosítása és az uniós szintű kockázatkezeléssel kapcsolatos döntések meghozatala során.
- Az aggodalomra okot adó anyagok helyettesítésével innovációra serkenti a vegyipart.

A tagállamok az Európai Bizottságnál az ECHA felügyeletével intézett beadványaikban a vegyi anyagok fenntarthatóságát célzó uniós stratégia szigorításához a következő rendelkezések beiktatását kezdeményezték:

- Németország és Svédország által 2017 októberében a hatályos korlátozó rendelkezés alatt álló PFAS-okon kívül további hat (C_9 és C_{14} szénatomszámú) perfluor-karbonsavakra, azok sóira és egykori vegyületeire való kiterjesztés.
- Németország 2019-ben további megszorítások bevezetését javasolta a perfluor-hexánsavra, sóira és a hozzá kapcsolódó vegyületekre.
- A norvég hatóságok 2019-ben nyújtottak be korlátozási javaslatot a perfluor-hexánszulfonsav szabályozására.
- Hollandia és Németország a skandináv országok egyetértésével számos PFAS vegyület alkalmazásának hathatós intézkedések feltételezéséhez kapcsolt mérséklését követelte.
- Az ECHA bejelentette a tűzoltóhabokhoz használt, ám veszélyesnek minősített PFAS vegyület korlátozásának az EU követelményeit kielégítő módon való előkészítését. A javaslatot 2021 végéig benyújtották.
- Az ECHA kezdeményezésére az EU korlátozásokat vezetett be bizonyos textíliák PFAS vegyületekkel való kezelésénél.

A REACH-rangsorolási listán található különös aggodalomra okot adó vegyületek (Substances of Very High Concern) besorolását az Európai Bizottság 2019 júniusában és 2020 januárjában két csoportban tárgyalta és értékelt. **Az EU vegyi anyagokra vonatkozó távlati terve teljes mértékben figyelembe veszi a vegyi anyagok meghatározó szerepét az emberi jólét**

biztosításában, valamint a gazdaság és társadalom zöld és digitális átállásában. Ebben a szellemben konkrét intézkedéseket vázol fel a vegyi anyagok biztonságosságának és fenntarthatóságának kezelésére, hogy a kifejlesztett vegyi anyagok előnyeit a bolygó és az emberi egészség károsítása nélkül hosszú távon élvezhessük. **A cél az, hogy az emberi egészségre és a környezetre leginkább káros anyagok használatát korlátozza,** különös szigorral lépjen fel a fogyasztási cikkek és legveszélyeztetettebb csoportok tekintetében, egyidejűleg minden veszélyes vegyi anyag kapcsán **előrevetítse a biztonságosabb és fenntarthatóbb használatot.** A bizottság felhívja a tagállamok figyelmét, hogy az uniós iparágak zöld és digitális átállásához szükséges beruházásokat a Helyreállítási és Rezilienciaépítési Eszköz támogatja.

2020 elején öt tagállam (Dánia, Svédország, Norvégia, Németország és Hollandia) kezdeményezte mindazon PFAS vegyület REACH-beli korlátozását, amelyek a rendelet 69-es cikkelyében sértették az előírásban rögzítettek. A panaszolt alkalmazások elbírálásának felettébb nagy jelentősége van, hiszen a társadalom számára nem lényeges felhasználásokat ezáltal megnehezíti és egyúttal mérsékeli a környezet elfogadhatatlan terhelését.

A vegyi anyagokra vonatkozó uniós szintű tilalmakat korlátozás fedőnéven kezelik a REACH vegyi anyag-rendelet keretein belül. A rendelet ehhez többlépcsős, komplex eljárást ír elő, amely magában foglalja a korlátozás környezeti és egészségügyi kockázatainak, valamint társadalmi-gazdasági hatásainak független tudományos értékelését. Az ECHA (Európai Vegyi anyag Ügynökség) a folyamat minden lépéséről jelentést készít, konzultál a gyártó vállalatokkal és a nyilvánossággal. A többfokozatban zajló, körültekintő felülbírálat igénylő szabályozási eljárás általában 19–21 hónapot vesz igénybe, a teljes eljárási ügymenet a Kockázatértékelési Bizottság és a Társadalmi-gazdasági Elemzési Bizottság ellenőrző és elemző tevékenységével együtt 3,5–5 évig tart.

A vegyi anyagok osztályozása, címkézése

Világszerte különböző vegyi anyag osztályozási és címkézési rendszereket (C&L) használnak. Ugyanazt az anyagot „mérgezőként” osztályozhatják az Egyesült Államokban, „ártalmasként” az Európai Unióban és „nem veszélyesként” Kínában. Ezen eltérések kiküszöbölésére és az emberek és környezet védelmének erősítése céljából 2002-ben az Egyesült Nemzetek Gazdasági és Szociális Bizottsága (UN ECOSOC) kidolgozta a GHS rendszert, amelyet 2005-ben és 2007-ben felülvizsgáltak. Az ENSZ-szinten a vegyi anyagok osztályozására és címkézésére kidolgozott GHS-nek nincs közvetlen joghatása.

2009. január 20-án az 1272/2008/EK európai GHS rendelet, azaz a CLP rendelet (C osztályozás, L címkézés és P csomagolás) néven lépett hatályba, Európa-szerte új rendszert vezettek be az anyagok és keverékek osztályozására, címkézésére és csomagolására. A korábban érvényes osztályozási és címkézési rendszer jogalapját képező 67/548/EGK (anyagirányelv) és 1999/45/EG (készítmény irányelv) európai irányelvek 2015. június 1-től hatályukat veszítették. Az új szabályozásra való átálláshoz hosszú átmeneti időszakokat terveztek. A CLP-rendelet az anyagokra 2010. december 1-től, a keverékekre pedig 2015. június 1-jétől kötelező érvényű.

Az anyagokról és készítményekről szóló irányelvvel ellentétben, amelyet át kellett ültetni a nemzeti jogba, a CLP-rendelet, mint REACH rendelet ((EK) No. 1907/2006), közvetlen hatályú az EU tagállamaiban. Az átmeneti időszak végéig tehát lehetőség van a termék forgalomba hozatalára akár a „régii” EU-címkével, akár az új GHS címkével, a „kettős jelölés” azonban mindkét jelölőelemmel soha nem megengedett.

A CLP rendelet fontos része a környezetre veszélyes anyagok és keverékek, pontosabban a vízi környezetre veszélyes anyagok és keverékek veszélyességi osztálya. Emellett már létezik egy veszélyességi osztály az ózonréteget lebontó anyagokra. Az EU 2021. januártól hatályos ivóvíz irányelvében foglaltak szerint valamennyi PFAS vegyületre 0,5 µg/l határértéket határoztak meg. 2020. szeptember óta érvényben van az új biztonsági küszöbérték, mivel az emberi szervezetben bizonyos zöldségekkel és ivóvízzel a PFOA, PFOS, PFNA és PFHxS vegyületek mennyisége dúsul; Németországban a szennyvíz vonatkozásában ez az érték meghatározott.

A PFAS vegyületek alkalmazása

A per- és polifluorozott alkil vegyületek egyre nagyobb kihívást jelentenek az élelmiszerbiztonság és a környezetvédelem szempontjából. Korábban azért feltételezték, hogy nincs káros hatásuk, mivel méretüknél fogva sem tudnak beleoldódni a környezet különböző rendszereibe. A rendkívül széles körben használt „szuperanyag” azonban bizonyítottan súlyosan károsíthatja az egészséget. Számos alkalmazási lehetőségük közül világszerte a következőkben felsoroltak a legelterjedtebbek:

- *Textilipar:* kitűnő víz-, olaj-, zsír- és piszkot taszító képessége alapján külső ruházatok, de leginkább védőruhák készítése. A textíliákhoz használt impregnálószert PFAS- tartalma biztosítja, hogy az anyag kiemelt tulajdonsága többszöri mosás után is megmaradjon. Kiváló piszoktaszító sajátsága révén elterjedten alkalmazzák szőnyegek előállításánál is.
- *Élelmiszercsomagolás:* zsír- és víztaszító tulajdonsága okán kartonpoharak és pizzás dobozok készítésénél kurrens alapanyagként használják. A tapadáscsökkentés, olajnak, zsíroknak és hőnek való ellenállás érdekében elsősorban a papír alapú csomagolásokat (patogatott kukorica), de időnként műanyagokat is a kockázatos PFC/PFAS-vegyületekkel kezelik. Egy 2018-as kutatás során a gyorséttermi csomagolások harmadában mutattak ki nagy koncentrációban PFAS vegyületeket.
- *Főzőedények:* fazekak és serpenyők előállításánál a főzés alapanyagának odakozmálás elleni védőbevonatként alkalmazott PFAS vegyszer a teflon márkanéven ismertté vált poli(tetrafluor-etilén) (PTFE), amely gyakran az elkészült terméken is előfordul.
- *Tűzoltóhab* egyik PFAS-tartalmú filmképző szer összetevője, amely a földbe, vagy tiszta vízbe való kerülése esetén igen veszélyes.
- *Galvanizálás:* fém, és műanyagtárgyak krómozásánál a galvanizálókád felületi feszültségének csökkentésére és a króm aeroszol gőz felszállásának megakadályozására. adalékanyagként PFAS-t tartalmazó nedvesítőszerket alkalmaznak, amelyek biztosítják a bevonó vegyszerek egyenletes felületbevonását. Az egészségügyi kockázatot jelentő paraméterek vizsgálata során a Svéd Élelmiszerügynökség felhívta a figyelmet a feltehetően magas PFAS-tartalmú víz beható ellenőrzésére. Ezért a korábban nedvesítőszerként alkalmazott perfluor-oktánszulfonsavat (PFOS) ma már többnyire a kevésbé veszélyes 6:2 fluor-telomerszulfáttal helyettesítik.
- *Gyógyászat:* A fluor nem esszenciális elem, nyomelemként azonban fontos szerepet tölt be a csontképződésben, felelős a csontok és a fogzománc keménységéért. A huszadik század közepétől kezdődően számos vizsgálat bizonyította a helyi alkalmazású fluorid fogszuvasodást csökkentő hatását. Ma a világ népességének hat százaléka jut mesterségesen fluoridozott vízhez. Ugyanakkor a nagy mennyiségben fogyasztott fluorid egyik okozója lehet a fluorozisnak, amiért 40%-ban, közvetlenül vagy közvetetten a vezetékes víz fluorozása tehető felelőssé.

A modern gyógyszerek mintegy húsz százaléka tartalmaz fluort. A fluor-18 izotópot például radioaktív nyomjelzőként gyakran alkalmazzák a Pozitronemissziós Tomográfiai (PET) vizsgálatokban, amely a szövetek cukorfelvételének intenzitását mutatja.

- További terjedelmes felhasználási területeket ölelnek fel a kozmetikumok, viaszok, kenőanyagok, növényvédőszer gyártásához való alkalmazásukkal, valamint az épület-homlokzatok színezésében.

A per-és polifluorozott vegyszerek terjedési módjai, útvonalai

A szerves kémiában az egyik legerősebb kémiai kötést (szén-fluor) tartalmazó PFAS vegyületek mind a használat során, mind a környezetbe kerülve a lebomlással szemben ellenállóak, tartósan megmaradnak. A környezetbe jutó PFAS-k viszont könnyen szállíthatók nagy távolságra a kibocsátás helyétől. A perfluor-alkil anyagok (vagy röviden PFAS) mesterségesen előállított kémiai anyagok, amelyekbe beletartozik a perfluor-oktánsav (PFOA), a perfluor-oktán-szulfonát (PFOS), a perfluoronánsav (PFNA), perfluor-hexán-szulfonsav (PFHxS) és sok más hasonló vegyület. Bizonyos PFAS-k, mint pl. a PFOA és a PFOS, valamint a PFNA és a PFHxS nem bomlanak le sem a környezetben, sem az emberi testben, ezért idővel akkumulálódnak.

A perfluor-alkil anyagokkal szembeni expozíció – az orvoslásban a szervezet kitétele valamely káros külső hatásnak – komoly egészségügyi problémákat okozhat. Az emberek a PFAS vegyületekkel leginkább élelmiszeren keresztül válhatnak kitetté. Az élelmiszerbe többféle módon kerülhet PFAS, pl. szennyezett talajon vagy vízben keresztül, vagy szennyezett takarmánnyal, amit az állat megevett, majd ezután az ember elfogyasztja az állatot, valamint PFAS-t tartalmazó élelmiszer-csomagolóanyagon vagy -feldolgozó eszközön keresztül.

A PFAS tartalmú termékek akár már az előállításuk során az ipari területről a szellőzőkön keresztül a levegőbe, a környék talajába, vizeibe kerülhetnek.

- A perfluor-alkil anyagok rendkívül könnyen – esővel, hóval, széllel – szállíthatók a kibocsátás helyétől nagyon messze eső területekre. Már a saki régiókban és az alpesi tavakban is kimutatták a PFAS anyagok jelenlétét.
- Beltéri előfordulása háztartási impregnáló spray használatával, piszkot taszító vegyszerrel kezelt szőnyegekben, illetve lakástextíliákból való kipárolgás útján jön létre.
- Lakossági és ipari szennyvizeken keresztül szennyvíztisztítóban halmozódhatnak fel, ahol nem bontódnak le, hanem további hosszú élettartamú per- és polifluorozott vegyületekké alakulnak. A szennyvíztisztítás során kezelt víz részben a felszíni vizekben eloszlik. A szennyvíziszapban felhalmozódott anyag a mezőgazdaságban műtrágyaként való hasznosítása során beszivárog a talajvízbe, ahonnan a vízzeloldható PFAS vegyületek világszerte folyókba, tengerekbe kerülnek.
- A tűzoltóhabok hatóanyagaként alkalmazott per- és polifluorozott vegyületekben magas koncentrációban jelenlévő vegyszer tűzoltás során közvetlenül a talajon és a vízben keresztül a környezetbe kerül.
- Az emberek többféle módon veszélyeztetettek a PFAS anyagokkal szemben: élelmiszeren keresztül közvetlenül, mivel az élelmiszert a csomagolóanyagon vagy a feldolgozóanyagon keresztül szennyezi, illetve közvetett módon az állati eredetű táplálék elfogyasztásával. A foltálló, víztaszító ruházatunk, bútoraink szintén tartalmaznak PFAS vegyületeket.

A PFAS-oknak való kitettség hatása az emberi egészségre és a környezetre

A PFAS vegyületek rendkívül komoly kockázatot jelentenek az elfogyasztott élelmiszer és a szennyezett ivóvíz által az egészségbiztonság vonatkozásában, továbbá a globális felmelegedést gyorsító üvegházhatású gázok csoportjába tartozó polifluor-alkilok vagy perfluor-karbonok (PFC) révén. A fejlett nyugati országok egészségvédelmi felügyelőiségei ezért beható vizsgálatokat kezdeményeztek a PFC-k emberi egészségre káros hatásaival kapcsolatban.

- 2015 májusában 200 kutató írta alá az úgynevezett Madridi Nyilatkozatot, amely a PFA-s vegyületek ártalmaira figyelmeztet. Tanulmányuk az Environmental Health Perspectives nevű szakfolyóiratban jelent meg, majd a National Institute of Health tudósai is megerősítették, hogy a PFA elsősorban a vese- és a herék kialakulásának kockázatát növeli, de nagy szerepet játszik a pajzsmirigy-alulműködés és a gyulladós bélbetegségek létrejöttében.
- A világhírű Johns Hopkins Egyetem Bloomberg Közegészségügyi Iskolájában is végeztek méréseket a PFC-k káros hatásával kapcsolatban. Kutatások eredményei alátámasztották, hogy daganatok és fejlődési rendellenességet okozhatnak, az emberi magzatok már az anyaméhben ki vannak téve a per-fluoroktán szulfát (PFOS) és a per-fluoroktán (PFOA) veszélyes hatásának.
- A Ger ES V 2014-2017 német Gyermek és a Fiatalok Egészségének Környezeti Tanulmányban 1109 3–17 éves gyerek és fiatal vérmintájában 12féle PFAS vegyület hatására bekövetkezett változásokat elemezték. A vizsgálat eredménye szerint a szoptatott gyermekek vérplazmájában magasabb PFAS koncentrációt találtak, mint a nem szoptatott gyermekekében.

A 2009–2019 közötti években folytatott PFOA és PFOS vizsgálatok eredményei azonban csillapították a PFAS vegyületekkel kapcsolatos aggodalmakat. Az analizált emberi vérmintákban az 1986-ban végzett vizsgálati eredményekhez viszonyítva a PFOA-tartalom 70%-kal, a PFOS-tartalom pedig több mint 90%-kal csökkent. Az eredményt azzal magyarázták, hogy a korábbiaktól eltérően másfajta PFAS vegyületeket is alkalmaztak, amelyek hosszantartó befolyásáról még kevés információ áll rendelkezésre, ezért káros hatásuk még nem érte el a mérhető szintet.

A PFAS környezetet veszélyeztető hatása egyértelműen a levegőbe és a talajba kerülő PFAS vegyületekre vezethető vissza. A felszíni vizek, vagy nyílt vizek a globális vízciklus részeként állandó cserében és kapcsolatban állnak a felszín alatti talajvízzel és az óceánokkal. Az ipari és a kommunális víztisztítókból, a tűzoltóhabokon keresztül, a PFAS-sal szennyezett talajról, a talajfelszínről lefolyó víz szennyezi a környező vízkészletet, amelyből a veszélyes anyag tengerekbe, óceánokba jut. A talajba kerülő PFAS-k kis koncentrációban már szinte mindenhol kimutathatók. Nagyobb mennyiségű PFAS anyag van jelen a tűzoltóhabokban, a víztisztító iszapban, a környező levegőben, amelyek a lefolyó/áradó vízzel a talaj mélyebb rétegeibe, végül a talajvízbe kerülnek. Németországban 15 szövetségi tartományban vizsgálták a talajvíz PFAS tartalmát, amelyek 70% fölötti PFAS mennyiséget mutattak ki. Mivel más EU-tagállamban is hasonlóan magas értékeket mértek, egyértelműen kijelenthető, hogy Európa-szerte perfluor- és polifluor-alkil vegyületekkel szennyezett a talajvíz. A leggyakrabban kimutatott PFAS vegyületek a perfluor-butánsav és a perfluor-hexánszulfonsavak voltak.

A nélkülözhetetlen fluorpolimerek biztonságos gyártása és ártalmatlanítása

A fejlett, modern világban digitalizált műszaki életünk nélkülözhetetlen tartozékává vált fluorműanyagok előállításához fenntartható gyártási technológiára van szükség, ezért velük kapcsolatban

megkülönböztető értékelés és szabályozás vált indokolttá. A fluorpolimerek speciális módon különböznek a többi PFAS vegyülettől, ám a PFAS vegyületekre folyamatban lévő hatósági újraszabályozás érinti a fluorpolimerek behatóbb felülvizsgálatát is. A fluorpolimerek alkalmazása a hatályos szigorúbb hatósági előírások révén lényegesen körülményesebbé vagy akár tiltottá is válhat.

- ❖ Az újraszabályozás középpontjában a fluorozott polimerizációs segédanyagok és azok emissziói állnak, ezért célszerű volt a **fluortartalmú segédanyagok drasztikus mértékű csökkentését** napirendre tűzni. Elsősorban fluormentes vagy emisszió szegény emulgeátorok használata kívánatos, például a jelenleg előállított fluorpolimerek 50–60%-ánál már egyáltalán nem alkalmaznak fluortartalmú segédanyagokat. Ebből a szempontból is különös jelentősége van a vinilidén difluorid polimerizációjával előállított, kevesebb fluoratomot tartalmazó sokoldalú alkalmazásáról ismert polivinilidén-difluoridnak (PVDF), valamint a szuszpenziós eljárással gyártott lágy fluorpolimer S-PTFE-nek. 2022 márciusában a klór-metán hűtőközeg és a PTFE egyik legnagyobb gyártójaként ismertté vált indiai Gujarat Fluorochemicals cég bejelentette, hogy fluortartalmú polimerizációs segédanyagok nélkül sikerült vizes fluorpolimer-diszperziós polimerizációt megvalósítani. A diszperziót főleg a textilépítészetben (membránokkal és kábelekkal történő ideiglenes „építkezés”) alkalmazott üvegszövet tapadásmentes bevonására használják.
- ❖ Folyamatban lévő vizsgálatok kimutatták, hogy a kibocsátott, **veszélyesnek minősített emissziós anyagok csupán 2,69%-a kapcsolódhatott az EU-ban használt összes PFAS vegyülethez**. A feltárt veszélyes emissziós anyagok feltehetően a fluorozott oldalláncú vegyületektől származtak, amelyeket elsősorban fogyasztási cikkek (textíliák, bőr- és papíráruk) készítésénél használnak. A fluorvegyületek másik kritikus pontját azok felhasználásával készült termékek elhasználódásakor bekövetkező deponálás képezi.
- ❖ **A hulladék megsemmisítésének** egyik módja az elégetés, azonban ésszerű **megoldásként az újrahasznosításra kell törekedni**. A PTFE és fluorozott speciális adalékanyagok gyártásában, valamint fejlesztésében világszerte vezető szerepet betöltő német Dyneon GmbH együttműködve az Universität Bayreuth-tal, kémiai recikláló módszert fejlesztett ki a PTFE-re és a fluorozott termoplasztokra. Az új UpCycling-eljárással magas hőmérsékleten a fluortartalmú hulladékot gázállapotú monomerekre bontják, amelyek tisztást követően minőségromlás nélkül újabb polimerizációs folyamatban ismét felhasználhatók. A gyártók véleménye szerint a reciklálással előállított fluorpolimer minőségével kapcsolódóan nem szükséges kompromisszumok elfogadásra, hiszen ezen a módon az anyag körforgásai gyakran alkalmazhatók.

Fluor műanyagok sokrétű alkalmazása

Az összes fluorműanyag helyettesítése kockázatos vállalkozás lenne, hiszen az alkalmazásukkal készült termékek különleges tulajdonságokkal és azok kombinációjával rendelkeznek, ezért hiányukkal a kulcsfontosságú iparágakban nehézségek merülnének fel. Egyéb polimerek a megkívánt éghetőségi, tartós hőmérsékletállósági jellemzők és az alacsony élettartam hiányában, valamint a nagy karbon lábnyom kockázat miatt nem merülnek fel, mint fel kompetens alternatívák.

A fluortartalmú műanyagtermékek sokrétű alkalmazhatóságát jól szemlélteti például, hogy a szálerősített műanyag szerkezeti elem fluorpolimerből készített betétjei/bélései nagy biztonsággal

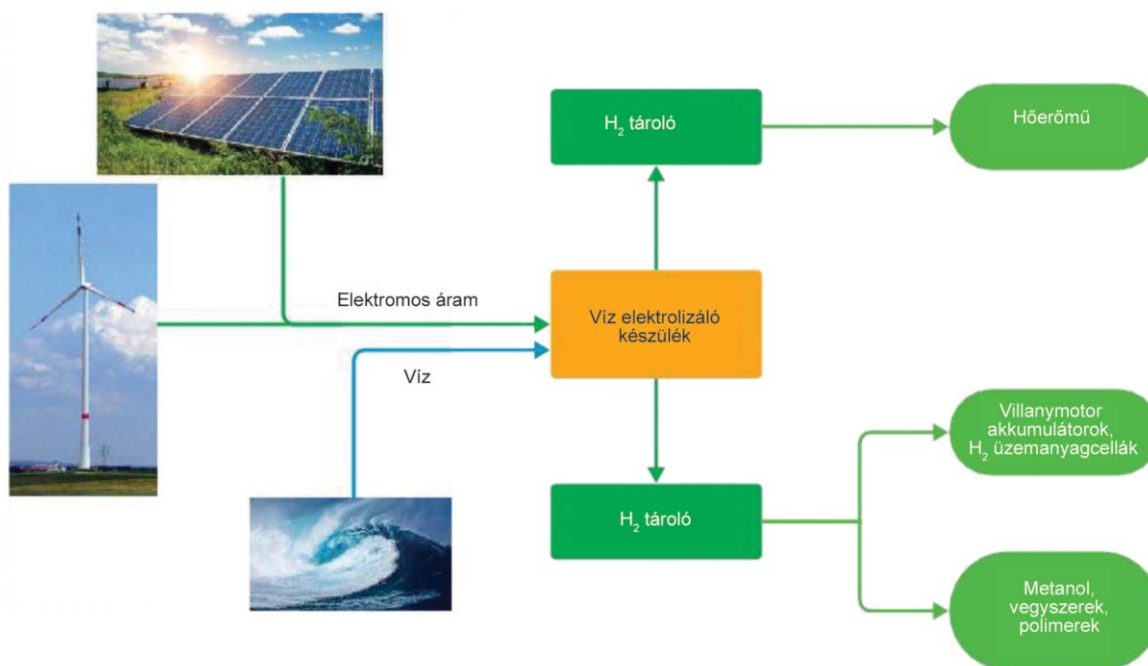
garantálják a legnagyobb kémiai tisztaságot, mivel a konstrukcióban egyáltalán nincsenek szennyező fémionok.

Nyomtatott áramkörökhöz és nagyfrekvenciás elektronikai alkatrészekhez PTFE és FEP fluorpolimerrel készült nyák-lapokat használnak. A jövő emisszióredukálását segíti elő az elemek, akkumulátorok széleskörű felhasználásához, elektromos autókhoz használt, felettebb kedvező feldolgozású (fröccsöntés, öntés, hegesztés) PVDF. Kiváló piezoelektromos tulajdonsága alapján membránok és más elektrokémiai alkalmazásoknál rendkívül jó hőstabilitást tanúsít. Mérésekkel bizonyították, hogy 150 °C-on 10 éven tartva nem szenvedett sem termikus, sem oxidatív bomlást.

A fluorpolimerek megfelelnek a REACH által definiált perzisztencia (tartós fennmaradás) engedélyezés előírásainak. Sajátos fizikai kémiai tulajdonságai következtében az Európai Bizottság által 2020-ban elindított EU Green Deal éghajlat-változási stratégiája és az ENSZ fenntartható fejlődést világszerte ökológiai szinten biztosítani hivatott célkitűzéseivel összehangolva Polymers of low concern (PLC) az egészséget és a környezetet nem veszélyeztető csoportba sorolhatók. A fluorpolimerek közül négy fluorpolimer – PTFE (polifluor-tetraetilén), FEP (fluoretilén-propilén), ETFE (etilén-tetrafluoretilén), PFA (perfluoralkoxi) – kielégíti a PLC besorolás feltételeit. 2015-ben a fluorpolimereket vizsgáló világszerte felmérés 70–75%-ban ezt a négy fluorpolimert biokompatibilisnek, oldhatatlannak és nagy molekulatömege révén a sejtekre, így az élettani folyamatokra, valamint a környezetre vonatkozó káros hatását csak lényegtelennek nyilvánította.

A PTFE kitűnő víztaszítóképesége, magas hőmérsékletállósága, kiváló kopásállósága és kémiai anyagokkal szembeni védettsége, rendkívül nagy molekulatömege, valamint alacsony relatív permittivitás értékéből eredően a gigahertz tartományban tanúsított jelcsillapítása folytán különleges alkalmazási területeken nélkülözhetetlen anyaggá vált.

- Az 1. *sematikus ábrán* bemutatott karbonmentes „zöld” hidrogén üzemanyag termelésénél, ahol a PTFE-t (poli(tetrafluor-etilén)) és a módosított PTFE-t pótolhatatlan tömítőanyagként alkalmazzák a víz megújuló áramforrásokból nyert „zöld” árammal történő elektrolízisekor. A „zöld” hidrogén az egyik kulcseszköze a klímavédelmi célok elérésének,



1. ábra. „Zöld” hidrogén elektrolízissel történő előállítás megújuló árammal.

- hiszen előállítás és felhasználása nem jár üvegházhatású gáz kibocsátással. Az elektrolizáló berendezésben az anód és a katód elválasztását biztosító fluoridtartalmú polimerrel készült ionáteresztő választómembrán készítéséhez használják.
- Olyan területeken is jól alkalmazható, ahol az elektrifikáció nem képes valós „zöld” alternatívát nyújtani, mint például a nehézgépjármű-közlekedés vagy az ipar. Az energiaátállítás során a közeljövőben fontos szerepet kaphatnak a „zöld” hidrogén előállítására szolgáló elektrolizáló berendezések. Az energiaár-krízis előtt a „zöld” hidrogén árban nem tűnt versenyképesnek a földgázból előállított szürke és kék hidrogénnel szemben, most azonban felbecsülhetetlen értékű üzemenyag.
 - Ionmembrános gázszeparációnál, például hidrogén-ammónia elegyből H₂ visszanyerése, füstgázok szűrése, földgáztisztítás.
 - Járműápolás, tisztítás: a fluorpolimerek (PTFE) felhasználásával készült ápolószerek a fényezett autókülsőnek kiváló tartósságot és tapadásmentes vízlepergető képességet biztosítanak, fokozzák a lakkozott felület metál fényezését.
 - A fluorozott polimerek módosításával új alkalmazási lehetőségek jelennek meg: Alkalmazása elsősorban az olaj-, fém-, gyógyszer-, élelmiszer-, papír-, textil-, nukleáris- és vegyiparban terjedt el (fejőgépek, hőcserélők, szűrők, szivattyúk). A legtöbb hagyományos sterilizálási eljárásnak ellenáll. A féltermékekből jellemzően forgácsolással készíthetők folyadékot (víz, vegyszerek stb.) szállító csőrendszerekhez idomok, fittingek, csatlakozók, karmantyúk.
 - Nagy érdeklődés övezi a PTFE szerkezeti módosításával előállított poli(vinilidénfluorid) (PVDF) további felhasználásának eshetőségét az egészségügyben, mivel piezoelektromos jellegének kihasználásával elősegíthető a csont növekedése. Elképzelhető, hogy a törött csontok gyógyulását a jövőben PVDF implantátumokkal lehet gyorsítani, vagy a halláskárosultak fülimplantátumaiban hasznosítani. Alkalmazása elsősorban az olaj-, fém-, gyógyszer-, élelmiszer-, papír-, textil-, nukleáris- és vegyiparban terjedt el (fejőgépek, hőcserélők, szűrők, szivattyúk). A legtöbb hagyományos sterilizálási eljárásnak ellenáll. A féltermékekből jellemzően forgácsolással készíthetők folyadékot (víz, vegyszerek stb.) szállító csőrendszerekhez idomok, fittingek, csatlakozók, karmantyúk.

A fluorpolimerek értékláncának létrehozásában valamennyi résztvevő alapvető és legfontosabb érdeke, valamint felelőssége, hogy a fluortartalmú termék elhasználódásakor a fluoremisszió elkerüléséről gondoskadjon.

Összeállította: Dr. Pásztor Mária

Dr.M.Albrecht = Per- und polyfluorierte Chemikalien in der Diskussion = Der Umwelt Beauftragte, 29. April, 2021. p.1–5.

Hohe Hürden für Fluorpolymere= Kunststoffe, 5. 2022. p. 82–85.