

## Elektronikai hulladékból előállított műanyag reciklátum szennyeződéseinek nyomon követése és feltárása

Az elektronikai hulladékból céltudatosan leválasztott poliolefin bázisú műanyagok újrahasznosításával jó minőségű új termékek állíthatók elő. A feldolgozandó hulladék szennyeződéseinek a reciklátumok tulajdonságaira kifejtett komplex hatását jól tükrözik az újrahasznosított PE-LD-ből készült fűvott fólián megjelent hibahelyek PlastikBond projekt keretében végzett korszerű termoanalitikai és anyagtudományi vizsgálatok.

*Tárgyszavak: elektronikai hulladék, mechanikai- és elektrosztatikus szétválasztás, reciklált granulátum, újrahasznosított polietilén fűvott fólia, PlastikBond projekt, termoanalitikai, anyagtudományi vizsgálatok*

Az elektromos és elektronikai hulladék mennyiségét világszerte 42 millió tonnára becsülik. A vason, a színesfémeken, és a műanyagokon kívül az WEEE (Waste Electric and Electronic Equipment) jelentős mennyiségű nemesfémeket (aranyat, ezüstöt) és ritkaföldfémeket is tartalmaz. A régi készülékekből kinyert értékes anyagok körforgásba való visszavezetése mellett kiemelten fontos a produktív újrahasznosítási technológiák alkalmazása. Az elektronikai hulladékból származó magas újrahasznosítható anyagpotenciál optimális kihasználása ezért különösen hatékony válogatási és szétválasztási technológiát igényel.

Az autók, villamos berendezések, háztartási gépek elektronikai hulladékának újrahasznosítása kitüntetett figyelmet érdemlő feladatnak számít. A vas és másfajta fémek, mint az autóbontás nagyra becsült „kincsei” modern munkagépekkel könnyen elkülöníthetők. **Az elektronikai hulladék mintegy 15%-át kitevő műanyag hulladék halmazból céltudatos válogatással és a körültekintően szétválasztott anyagok újrahasznosításával értékes minőségű új termékek állíthatók elő.** Európában az elektronikai hulladékból reciklált újrafeldolgozható műanyag hulladék évente több 100 000 tonnára rúg. Az elektronikai hulladékokban nagyon gyakran nem kívánatos, a válogatást és főleg a műanyag reciklálását nagymértékben akadályozó idegen anyagok (fa, üveg, gumi, fémmaradékok és másfélék) is előfordulnak.

A vegyes műanyagkeverék üzemben tartása és a szennyeződéstől, más idegen anyagoktól való megtisztítása összetett feladat. Kimutatták, hogy az elektronikai hulladékok több mint 60féle műanyagfajtát tartalmaznak, amelyekhez eredeti feldolgozásukkor adalékokat, töltőanyagokat, égésgátlókat is társítottak. A megcélzott tiszta műanyag visszanyeréséhez ezért olyan technológiát kell alkalmazni, amely nem csak a nemkívánatos idegen anyagokat, hanem a másfajta polimer típusok jelenlétét is kiszűri.

### A műanyagkeverék leválasztása az elektronikai hulladékokból

A műanyagkeverékből potenciális újrahasznosítható anyag kinyerése folyamatos fejlesztési munkát kívánó, az egyik legfontosabb tervezési és kivitelezési technológiai művelet. A nagyon kis mennyiségben jelenlévő anyagféleség visszanyerése viszont sem a befektetett energia, sem a hozam szempontjából nem kifizetődő. A szóba jöhető eljárások üzemképességét a keverékben lévő anyagok eltérő fizikai és kémiai tulajdonságai határozzák meg.

### Dúsítási eljárások

Az egyes komponensek eltérő fizikai tulajdonságai – sűrűség, mágneses és elektromos jellemzők – alapján való szétválasztása:

- *Kézi válogatás:* A válogatószalag melletti kézi válogatás hatékonysága csak nagyobb méretű (>50 mm) hulladékok esetén jelentkezik.
- *Légáram:* Sűrűségkülönbségen alapuló válogatási mód. A levegőt az anyagárammal ellenáramban vagy keresztáramban vezetik be, amely a könnyebb anyagokat magával ragadja, míg a nehezebb hulladékok a gravitációs hatásnak engedelmessé haladnak tovább.
- *Légszér:* Szintén a szétválogatandó komponensek sűrűségének eltérését használja. Egy félig-áteresztő asztalon ventilátor által átfúvott levegő segítségével a hulladékból fluid ágyat hoznak létre, amelyből a nehezebb szemek az asztalra ülepednek, és a szalag kihordja azokat. Míg a könnyebb frakció a lejtő irányában lefolyva távozik a berendezésből.
- *Mágneses szeparálás:* A vas leválasztására alkalmas eljárás. Lehet kihordás nélküli felfüggesztett berendezés, és kihordással rendelkező berendezés.
- *Elektromos szétválasztás:* Elsősorban a vezető (fémek) és nemvezető anyagok szétválasztására szolgál. Lehet örvényáramú szeparátor és szabadesésű lapszeparátor az alkalmazott berendezés.

### Mechanikai elválasztási eljárások

Előválogatásként sok esetben alkalmazható a sűrűségkülönbségen alapuló, egyszerűbb gravitációs elválasztási eljárás, ahol az ismert sűrűségű közegben a hulladékáram egy része kisebb sűrűsége folytán a közeg felszínén úszik, míg a nehezebb műanyagok a közeg aljára süllyednek le. Az eljárás ily módon megkönnyíti a hulladékkeverék részbeni szétválasztását. Az elektronikai hulladékok sűrűség szerinti szétválogatása köztes sűrűségű közegben egyszerűen és jól automatizálható eljárással valósítható meg. További előnye az alacsony üzemeltetési költség és a nagy kihozatal is. Ennél az eljárásnál száraz, légáramlásos vagy nedves (víz vagy emulzió) szétválasztó közeget alkalmaznak. A köztes sűrűségű szétválasztó közegnél a kisebb sűrűségű hulladékok – a nagyobb felhajtóerőnek köszönhetően – a közeg tetején úsznak vagy lebegnek, míg a közegnél nagyobb sűrűségű műanyagok a közeg aljára süllyednek. A gravitációs elven működő elválasztás nehezen alkalmazható olyan keveréknél, ahol a keverék összetevői között nagyon csekély sűrűségkülönbség van.

A gyakorlati tapasztalatok tanúsítják, hogy az elektronikai hulladékokban legnagyobb mennyiségben polisztirol (PS), akrilnitril-butadién-sztirol kopolimer (ABS) és polipropilén (PP) fordul elő, amelyeket legegyszerűbb módon eltérő sűrűségük alapján tudnak egymástól elválasztani.

- *A száraz szétválasztás* áramoltatott légközegben valósítható meg, ahol a műanyagok különböző süllyedési sebességét használják ki, vagy a légszéreknél alkalmazott alulról történő befúvásos légárammal kialakuló fluidággal dolgoznak. Ha a szétválasztani kívánt hulladékok mérete teljesen megegyezik, légáramban a különböző polimerek sűrűségkülönbsége miatt a műanyagok süllyedési sebessége eltérő. A szeparálás során azok a nagyobb sűrűségű szemcsék süllyednek le, és választhatóak le a berendezés alján, amelyek a felfelé irányuló közeg légáramánál nagyobb süllyedési sebességgel rendelkeznek, a légáramnál kisebb süllyedési sebességű műanyagok pedig a légárammal megegyező, felfelé irányuló pályán haladnak.
- *A vizes szétválasztás a poliolefinok szétválasztásához nyújt kedvező elkülönítési módszert.* Például a PS és az ABS nagyobb sűrűségük folytán sóoldatos közegben könnyen leválaszthatók. Sóoldat és víz kombinációval sikeresen nyertek vissza nagy mennyiségű PP/PE-t, de igazi „favoritnak” PS/ABS-t tartalmazó keverékek számítanak. A PS/ABS keveréknél a kémiai nedvesítőszer jelenlétében a PS peremszöge alig változott a kémiai nedvesítőszer jelenlétében, az ABS esetében azonban a peremszög semleges kémhatású közegben jelentősen csökkent, nedvesíthető állapotba került, dominánssá vált a két műanyag közötti legnagyobb peremszög különbség. Ennek oka, hogy az ABS láncmolekulái közötti kötések érzékenyek a közeg pH értékének változására, és semleges kémhatású hidrogénkötés tud kialakulni az ABS és a szétválasztó közeg között. Ezáltal nagy tisztaságban lehetett szétválasztani a kísérletben a PS/ABS keveréket is egymástól.

Az elektronikai hulladékok sűrűség szerinti szétválogatása köztes sűrűségű közegben egyszerűen és jól automatizálható eljárással valósítható meg. További előnye az alacsony üzemeltetési

költség és a nagy kihozatal is. Ennél az eljárásnál száraz, légáramlásos vagy nedves (víz vagy emulzió) szétválasztó közeget alkalmaznak. A köztes sűrűségű szétválasztó közegnél a kisebb sűrűségű hulladékok – a nagyobb felhajtóerőnek köszönhetően – a közeg tetején úsznak vagy lebegnek, míg a közegnél nagyobb sűrűségű műanyagok a közeg aljára süllyednek.

- *A nedves közegekben történő szétválasztás* elméleti háttere megegyezik a száraz közegek elválasztásával. Az anyagáram szétválasztásához itt azonban a légáram helyett nedves közeg vagy emulzió alkalmazható, ahol a moderáló közegnél kisebb sűrűségű műanyagok a közeg felszínére úsznak fel a rájuk ható nagyobb felhajtóerő miatt, amíg a nagyobb sűrűségű szemcsék a közeg alján választathatók le. A nedves eljárásoknál nagyobb tisztaságban, éles elválasztási határ mellett különíthetők el az egyes anyagfajták. A művelet után azonban gondoskodni kell a reciklátumok megfelelő szárításáról, illetve a nedves közeg tisztításáról, regenerálásáról.

### **Elektrosztatikus erőterben végbemenő szétválasztás**

Eltérő felületi jellemzőkkel rendelkező műanyag érintkezésekor az anyagok töltött állapotba kerülhetnek. Ezt a jelenséget triboelektromos- vagy felületi súrlódáson alapuló kapcsolati feltöltődési jelenségnek nevezzük. A töltések áramlása két anyag között elektron átvitel, ion transzferrel és anyagáramlással valósulhat meg, amelyek közül az elektron átviteli eljárás a legelterjedtebb. A folyamat fő mozgató ereje a két különböző anyag érintkezésekor fellépő töltéskülönbség. Az elektromos szigetelő anyagok esetében, így a műanyagoknál is, az elektronok átadása a felszínen valósul meg. A különböző elektron affinitású anyagok között kialakuló töltéskülönbség nagyságrendekkel növelhető, hogyha a ledarált műanyagok között egyszerű érintkezések helyett súrlódás hozható létre. A töltések áramlásának mértéke növekszik a nyomás emelésével, ugyanis az érintkező anyagok nagyobb súrlódásnak vannak kitéve, amikor egymással vagy az edény falával ütköznek. Mivel a műanyagok elektromosan szigetelők, a töltésmennyiség az ismétlődő súrlódások miatt felgyülemlik az anyag felszínén.

Az anyagáram szétválasztásához száraz közeget alkalmaznak, így nem kell foglalkozni a szétválasztó közeg utólagos regenerálásával. A válogatási művelet előtt fontos lépés azonban a tisztítás és szárítás, ugyanis az eljárást csak tisztított műanyagok esetében lehet hatékonyan megvalósítani. Az elektrosztatikus térben a milliméteres nagyságú darálékok szétválasztása a legjobb hatásfokú, az ennél kisebb méretű szemcsék alkalmazása növeli az energiaköltséget a darálásnál és csökkenti az elválasztás hatásfokát, mert az apró szemcsék könnyebben tapadnak meg a szétválasztó berendezés falán. Amennyiben a daralék mérete túl nagy, a fajlagos felülettel arányosan az elektromos térerősség is csökken, ugyanis a szemcse méretének növelésével a szemcse mozgáspályájának megváltoztatásához szükséges térerősség nagysága exponenciálisan nő.

Az elektronikai műanyag hulladékok szeparálására az 1990-es években kezdték alkalmazni a triboelektrosztatikus válogatási módszert, ahol a szétválasztás során az ellentétes töltésű aprított műanyagokat elektrosztatikus térbe vezetik és válogatják szét a polaritásuk szerint. Mivel a műanyag hulladékok anyag típusonként más felületi tulajdonságokkal rendelkeznek, így ez a módszer alkalmas a szétválogatásukra, ugyanis mindegyik műanyag típus eltérő töltöttségi állapotba kerül az érintkezések után.

Az elektrosztatikus leválasztókat sikeresen alkalmazzák ásványi anyagokat feldolgozó, műanyagokat leválasztó és műanyag hulladékokat újrahasznosító üzemekben. Az elektronikai hulladékok újrahasznosításakor nagy mennyiségű kevert műanyag keletkezik. A benne található értékes anyagok, mint az ABS, PS és PP olyan mértékben szennyezettek idegen anyagokkal (fával, elastomerekkel és fémekkel), hogy további feldolgozásuk egyéb technológiai beavatkozás nélkül nem lehetséges. A berendezéssel olyan finomszemcsés nemkívánatos idegen anyagok (fa, gumi) választathatók le, amelyek elkerülhetetlenül előfordulnak a mechanikai feldolgozási folyamatokban. Az elektrosztatikus töltés lehetővé teszi a vezető és nem vezető ásványok, műanyagok és fémek szétválasztását. A nem vezető anyag eltérül a természetes pályájától, és így kivonódik az anyagáramlásból. A daralékban lévő fa szemcsék tartalmaznak nedveséget és elektromosan vezetővé válnak, így az elektrosztatikus módszerrel biztonságosan megoldható a rendszerből való eltávolításuk.

**A recikláshoz előkészített őrlemény további feldolgozását jelentős mértékben nehezítő elasztomerek (gumi, a szilikon) jelenléte komoly probléma forrása, mivel kis mennyiségben is előidézik az előállítandó késztermék minőségének romlását. Eltávolításuk az őrleményből elengedhetetlen.**

Az ABS és PS keverék elektrosztatikus szétválasztása során a nem kívánt elasztomerek túlnyomórészt negatívan töltődnek fel. Ezért főként a szintén negatív töltésű PS-frakcióval különülnek el. Elektrosztatikus leválasztás után az ABS-frakció gyakorlatilag gumimentes lesz.

A PS frakcióban lévő elasztomerek elkülönítésére a **Hamos Recycling & Separationstechnik GmbH** (Penzberg, Németország) az elasztomerleválasztásra alkalmas *Hamos RSS* szeparátort fejlesztett ki. Ezzel az eszközzel szinte teljesen le lehet választani a nem kívánt elasztomereket, mint erősen koncentrált hulladékfrakciót. Ezt követően már csak a PS frakció utólagos „átöblítése” szükséges. Az *1. ábrán* egy ilyen leválasztott elasztomer frakciót mutatunk be, amelyen jól kiemelkedik az elasztomerek markáns színezése.



**1. ábra.** Elkülönített elasztomer frakció a Hamos RSS-ből való leválasztás után

Röviden összegezve: Elektrosztatikus erőterben sikeresen oldották meg az elektronikai hulladékokból nyert műanyagkeverékben még jelenlévő szennyező elasztomerek leválasztását és szeparálták a tiszta ABS és a PS komponenseket.

### **A szennyeződések nyomon követése a feldolgozandó alapanyagban**

A gyógyszeripari, repülőgép- és autópári felhasználásra alkalmazott műanyagok körében a legszigorúbb minőségi követelményeket tartalmazó szabványok irányelvei szerinti nyersanyagok megbízható ellenőrzését, feldolgozását, valamint a gyártott termékek körültekintő, szigorú minőségi felülbírálatát rendelték el.

A többféle és különböző beszállítótól származó elektronikai hulladékból nyert, eltérő fizikai tulajdonságokkal rendelkező granulált műanyag reciklátumok mind a feldolgozhatósági, mind az előállítandó végtermék tulajdonsága tekintetében egyenetlenek, ingadozóak. A reciklált műanyag granulátumok tulajdonságait különböző hitelesített vizsgálati szabványokkal (a polietilénre és polipropilénre EN 15344 és EN 15345) ellenőrzik, azonban a megcélzott termékek előállításához felhasználható újrahasonosított műanyagokra vonatkozó egységes hatósági szabályozást még nem vezettek be.

A mai kritikus klímapolitikai helyzetben az anyagjellemzők mellett például a csomagolóanyagok tartóssága, a környezetre gyakorolt kihatásai és azok életciklust és költségeket is figyelembe vevő vizsgálata megkerülhetetlen tényezők. **A feldolgozandó hulladék szennyeződéseinek a reciklátumok tulajdonságaira kifejtett komplex hatását jól tükrözi az újrahasonosított PE-LD-ből készült fűvott fólián megjelent hibahelyek összetett vizsgálata.** A polietilén reciklátumot kettős rendszerrel gyűjtött könnyű műanyag csomagolásból nyerték. (**Duales System** Németországban a meglévő közrendészeti rendszer mellé magánkézben szervezett társaság a csomagolási törvénynek megfelelően a kereskedelmi csomagolásokból származó műanyag hulladék ártalmatlanítását ellenőrzi a termékfelelősség érvényesítése céljából.) Annak érdekében, hogy a műanyag-feldolgozás során a nyersanyagtól a végtermékig állandó minőséget biztosítsanak, alapfelszereltségként kézi világítóasztalokat és automatizált vizuális ellenőrző eszközöket alkalmaznak. Az optikai technológia így módon egyesíti a kézi szemrevételezés előnyeit az automatikus véletlenszerű anyagvizsgálattal.

Az 1980-as évek óta az **IKV** (Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen, Németország) számos, az újrahasonosítással, az újrahasonosított anyagok jellemzésével és felhasználásával, valamint az újrahasonosításra alkalmas terméktervezéssel kapcsolatos kérdésekre fejleszt megoldásokat. Az intézet legújabb kutatási eredményei digitális innovációkkal kombinálva jelentősen hozzájárulhatnak a műanyagok



újrahasznosításának növeléséhez. Idetartoznak például a teljes életciklus feltérképezésére szolgáló digitális infrastruktúra és az innovatív adattudományi módszerek.

**Az IKV a jobb újrahasznosítás érdekében** a digitális megoldások beazonosításához

holisztikus szemléletet alkalmaz. A **PlasticBond kutatási projekt keretében egy ipari érdekcsoporttal együttműködve olyan koncepciókat fejlesztenek ki, amelyek az életciklus minden szakaszában figyelembe veszik a termék- és folyamatulajdonságokat**, és azt az Ipar 4.0 platform anyagútlevele alapján információként továbbítják. Egyéb alkalmazások közé tartozik az újrahasznosított termékek hatékonyabb termék- és folyamatfejlesztése, a csomagolás ökológiai fenntarthatóságának (CO<sub>2</sub>-lábnyom) holisztikus optimalizálása, vagy a kiterjesztett gyártói felelősség (EPR) teljesítése. A 2. ábrán a **PlasticBond** kutatási projekt sematikus célképe tekinthető meg.



2.ábra. A PlasticBond projekt célképe

A reiklátumok ingadozó tulajdonságai nagy kihívás elé állítják a műanyag-feldolgozókat. A szennyeződések sokrétűsége és a feldolgozandó anyagot komplex módon befolyásoló hatása miatt az újrahasznosított anyag minőségét nehéz megjósolni. Az eltérő tisztaságú reciklátumok optimális felhasználása céljából az IKV-ban vizsgálják a különböző feldolgozási eljárásokra kifejtett hatásait is. Az újrahasznosított anyag minősége leginkább a hulladék forrásától és az alkalmazott technológiai tisztítástól függ. Az anyagelemzéshez termikus, reológiai, spektroszkópiai, mikroszkópos, kromatográfiai és mechanikai módszereket alkalmaznak. Figyelembe veszik a különböző műanyagok eredeti feldolgozása, felhasználása és a hulladék válogatás során előforduló szennyeződések fajtáit és azok keverékeit, valamint az újrahasznosított anyag mechanikai tulajdonságait befolyásoló anyagváltozásokat.

Az összegyűjtött elektronikus műanyag hulladékokban megbízható szakértelemmel végzett értékelés alapján túlnyomórészt PE és PP polimerek fordulnak elő. Ezen műanyagok feldolgozási módjainak lehetőségeiről és korlátairól az újrahasznosításukhoz megkívánt anyagjellemzők alapján döntenek. A reciklátum tulajdonságaira ható számos tényező és gyártási technológiai művelet során az újrahasznosítandó anyag többféle energiával és más, a minőségét befolyásoló tényezővel érintkezik. A reciklátum újrafeldolgozási folyamatában a releváns információk kicserélése és azok egzakt értékelése céljából a korrekt ökológiai fenntarthatóság meghatározásához indokolt összehangolt kooperációs hálózat létrehozása, egy új együttműködési modell kidolgozása, amely a hozzáadott értéklánc folyamatában nem áll rendelkezésre. Ezzel összhangban időszerűvé vált egy speciális adatplatform kifejlesztése, amely fokozza az információ kicserélését, feltárja a kommunális hulladék lerakódó helyeket, továbbá fenntarthatósági adatokat szolgáltat az alapanyagok, illetve a felhasználásukkal készült termékek dokumentálásához.

### A szennyeződések vizsgálata a reciklált granulátum feldolgozási folyamatában és a gyártott termékeken

Az újrahasznosított műanyagok ingadozó/egyenetlen tulajdonságai nagy kihívás elé állítják a feldolgozó szakembereket. Az újrahasznosított anyagból készült terméken megjelenő szennyeződésekre a feldolgozandó reciklátum minőségét meghatározó számos tényező, valamint a reciklátum feldolgozási paramétereinek hatása nagyon összetett és változó. Egy felület anyagösszetétele nagymértékben meghatározza annak technológiai tulajdonságait. A kristályos vagy amorf mátrixú szeretlen és szerves kompozit anyagok újszerű gyártási folyamatainak tesztelése részletes anyagelemzést igényel.

A műanyag hulladék újrahasznosításával előállított termék felületén megjelenő fekete foltok „Black Specks” részecskéket a szakirodalomban *Stippen*-nek nevezték el, amelyek kiterjedt vizsgálatáról a **PlasticBond** projekt keretében folyó kutatások eredményei alapján várhatóak tájékoztatások. A *Stippen* keletkezése több okra is visszavehető:

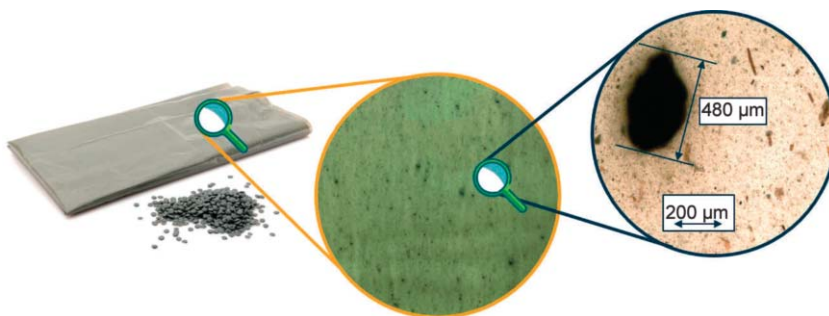
- tekinthetők a feldolgozási eljárásban használt olvadékszűrő szabványos pórusméreténél nagyobb pórusméretű anyagfelhalmozódásoknak,
- előidézhetik idegen anyagok, másfajta műanyag, agglomerátum képződése töltőanyaggal, a műanyagban lévő polimer térhálósodása és bomlása.

A műanyag-feldolgozás során az alapanyagtól a végtermékig állandó minőség biztosítása érdekében, alapfelszereltségként kézi világítóasztalokat és automatizált vizuális ellenőrző eszközöket alkalmaznak. Az optikai technológia egyesíti a kézi szemrevételezés előnyeit az automatikus véletlenszerű anyagvizsgálattal. A fröccsöntés problémájaként is szokták a fekete pontok megjelenését nevezni, amikor a kikeményedés után apró fekete részecskék (*Stippen*) emelkednek ki a felületből. A reciklált műanyagból fröccsöntött lemez felületén megjelenő fekete szemcsék a 3. ábrán jól láthatók.



3. ábra. Reciklált granulátumból fröccsöntött műanyag lemezen megjelenő fekete szemcsék

Az aktuális elemzés szerint az újrahasznosítási eljárás során az extrúziós hőmérsékleten az anyag gélszerű állapotban van és a szűrőn való keresztülhaladáskor a mechanikai behatás következtében a molekula alakjában bizonyos fajta deformáció alakulhat ki. Ez a viselkedés polietilén makromolekula, vagy a térhálós szerkezet jelenlétére utal. A 4. ábrán reciklált granulátumból előállított PE-LD fólián megjelenő szennyeződésekről készült mikroszkópos felvétel tekinthető meg.



4. ábra. Reciklált granulátumból előállított PE-LD fólián megjelenő szennyeződése

Az aktuális elemzés szerint az újrahasznosítási eljárás során az extrúziós hőmérsékleten az anyag gélszerű állapotban van és a szűrőn való keresztülhaladáskor a mechanikai behatás következtében a molekula alakjában bizonyos fajta deformáció alakulhat ki. Ez a viselkedés polietilén makromolekula, vagy a térhálós szerkezet jelenlétére utal. A 4. ábrán reciklált granulátumból előállított PE-LD fólián megjelenő szennyeződésekről készült mikroszkópos felvétel tekinthető meg.

- Az IKV differenciális pásztázó kalorimetria (DSC) módszerrel vizsgálta a fekete pontok jelenlétének a különféle polietilén típusok és polipropilén termikus tulajdonságaira kifejtett hatását. A termóanalitika leggyakrabban alkalmazott módszerével a mintában végbemenő entalpia változását méri, keresve azokat a pontokat, ahol a minta kémiai formája, kristályszerkezete, vagy halmazállapota megváltozik. Az entalpiaváltozásokat 10 K/min felfűtési sebességgel fekete pontokat nem tartalmazó és fekete pontokat 10–15% mennyiségben tartalmazó 1,5 mg tömegű PP-LD, PE-HD/PE-LLD, és PP polimertípusokon mérték. Valamennyi polimertípusból 10–10 próbán végezték el a vizsgálatokat, azonban a fekete pontokat tartalmazó és a fekete pontokat nem tartalmazó minták olvadási entalpia-értékei nem tanúsítottak értékelhető különbséget. Valamennyi mintán kivitelezett hűtési kristályosodási folyamat során sem mutatkozott szignifikáns entalpia-eltérés a fekete pontot tartalmazó szennyezett granulátumból reciklált és a tiszta granulátumból készült poliolefin termikus viselkedése között.
- A polietilén fólián megjelenő *Stippen* jellemzéséhez korszerű anyagtudományi vizsgálati módszereket, mint a pásztázó elektronmikroszkópia (Rasterelektronmikroszkop = REM) és az Energia-diszperzív Röntgenstrukturanalyse = EDX) mikroanalízis technikákat is alkalmaztak. Ezek kombinációja lehetővé tette, hogy a vizsgált minták felszíne alatti néhány nano-, illetve mikrométerről képi információkat közvetítsenek, valamint fél-quantitatív elemzéssel a szerves elemekről adatokat szolgáltatassanak. A mérések értékelése alapján a vizsgált fóliákon a legerősebb karakterrel rendelkező kalcium jelenléte volt kimutatható. Találtak továbbá titán, klór és szilícium jelenlétét igazoló detektálásokat is. Az anyageloszlásról készült képek alapján megállapították, hogy a szennyező részecskék mérete jelentősen kisebb a szűrők lyukainak átmérőjénél. További vizsgálatok

azt is igazolták, hogy a PE fólia felületén megjelenő szennyező fekete foltok kisebbek voltak, mint a 4. ábrán bemutatott, mikroszkópikus felvétellel készített részecskék beméretezett kiterjedése.

A REM és az EDX analízisből nyert információk értékelése alapján arra a következtetésre jutottak, hogy az alap-polimereket tartalmazó nyersanyagokhoz képest a reciklátumok gélképződésre való hajlama nagyobb, amely magyarázattal szolgálhat a reciklált anyaggal előállított fólia felületén megjelenő szennyeződésekre. Mindent egybevetve a közeljövőben a *Stippen* képződés pontos felderítése céljából további bizonyító vizsgálatok (például FT-IR – Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia) elvégzése vált indokolttá.

Újrahasznosított műanyagok nagy mennyiségű felhasználásával kiváló minőségű műanyag termékek előállítása a körforgásos gazdaság megteremtésének és fenntarthatóságának feltételei közé sorolható. Az újrahasznosított anyagok releváns tulajdonságainak megfeleltethetősége és hiba nélküli feldolgozhatósága érdekében az összevethető jellemzők szabványosítására van szükség. A **PlasticBond** konzorcium foglalkozik a problémás kérdések megválaszolásával, amely azonban nem zárja ki a műanyag reciklálás lehetőségeinek és felelősségének behatárolását.

Összeállította: dr. Pásztor Mária

Reine Fraktionen aus Elektroschrott/Recycling=Kunststoffe, 2022.11, p.54–57.

Verunreinigungen auf der Spur/Recyklate=Kunststoffe, 2022, 11, p. 60–63.

Extrusion von Flachfolien-Untersuchungen von Foliendefekten=Johannes Kepler Universität Linz, TNF 2015

Műanyagok újrahasznosítása = BME, Polimertechnika Tanszék, 2014