

Az extruderek szellőztetése

A műanyag-feldolgozás egyik fontos, de néha háttérbe szoruló lépése a gép szellőztetése, gáztalanítása. Ennek a lépésnek az a célja, hogy a polimerömlédekből eltávolítsuk a nem kívánatos illékony szennyeződések, pl. a reagálatlan monomert, oldószereket, vizet, oldott gázokat. Az alábbiakban az extruderek gáztalanítását tárgyaljuk.

Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; extrúzió; csigakiképzés; gáztalanítás.

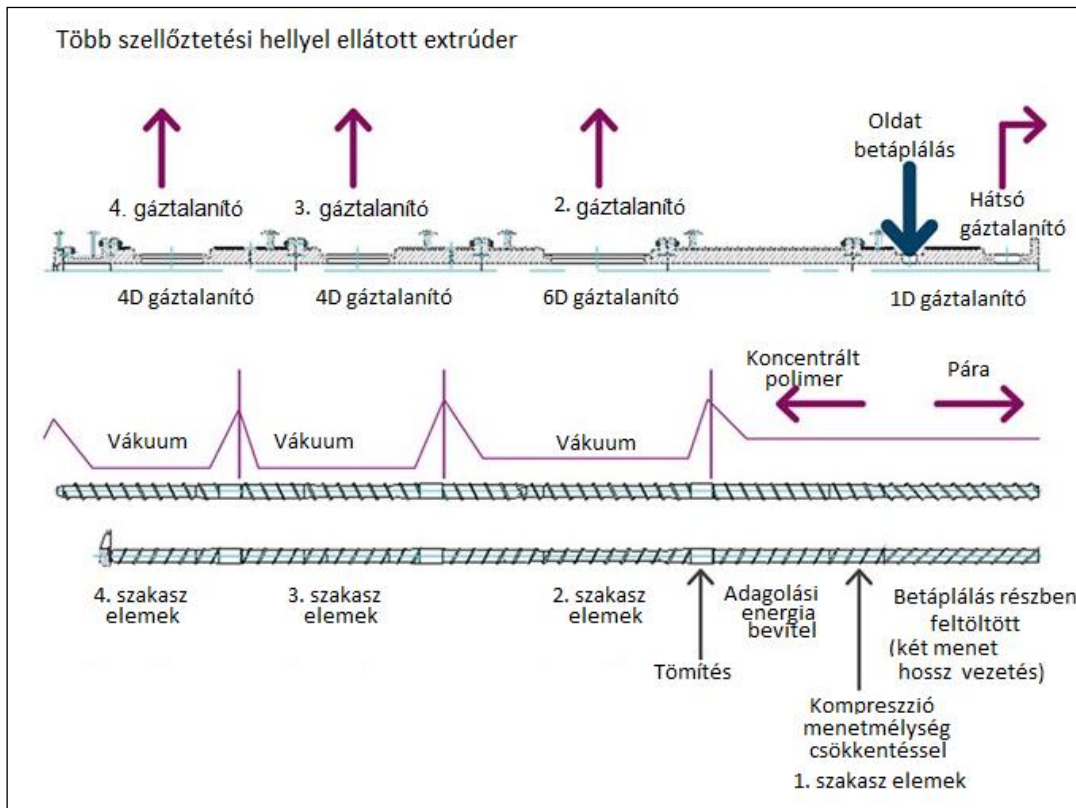
Az extruderek szellőztetése (gáztalanítása) az a folyamat, amelynek során a reagálatlan monomert, oldószereket, vizet, oldott gázokat és más, nem kívánatos illékony szennyeződések eltávolítunk a polimerömlédekből, vagy oldatból. *Ez egy tömegáramlási folyamat, amelyet diffúziós változók kontrollálnak, amelyekre a feldolgozó gép kialakítása van hatással.* Az illékony komponenseket nyomás alatt forráspontjuknál jóval magasabb hőmérsékletre kell hevíteni, majd ezután a műanyagömlédeket, vagy oldatot, gyors nyomáscsökkenésnek kell kitenni.

Az egy- vagy többcsigás extrudereket (vagy más műanyag-feldolgozó berendezéseket) úgy lehet kialakítani, hogy alkalmasak legyenek gáztalanításra. A konkrét megoldás függ a feldolgozandó polimer fajtájától, az illékony anyagok koncentrációjától, és a terméktől megkövetelt más feldolgozási akcióktól.

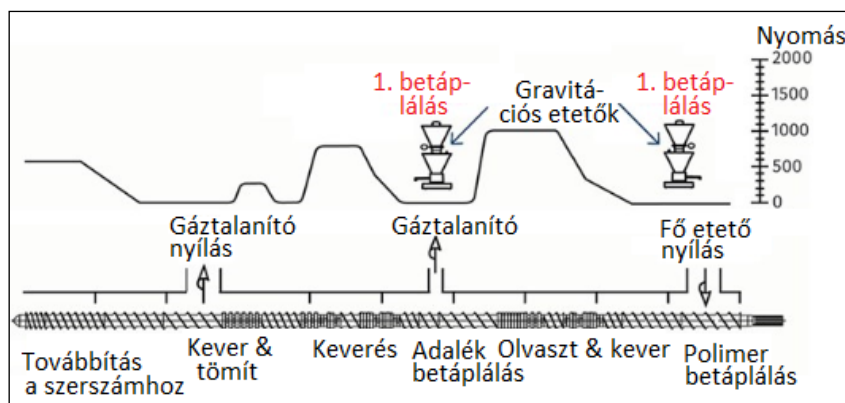
Annak ellenére, hogy ez milyen fontos és gyakori eljárás, viszonylag kevés leírása található meg a szakirodalomban. Az extruderek gáztalanításának kialakítására vonatkozóan hasznos információkat lehet azonban találni a szabadalmi leírásokban. Sok szabadalom vonatkozik a csigák, a szellőzőnyílások kialakítására, a nem csigás megoldásokra, stb., amelyek áttanulmányozása mélyebb megértést nyújt e témakörben.

A gáztalanító zóna elemei

Mind az egy-, mind pedig a többcsigás extruderekben a tipikus gáztalanító zóna a csigának egy olyan szakaszára esik, amely csak részlegesen van feltöltve, és amely két olyan csigaszakasz közé esik, amelyek teljes mértékben fel vannak töltödvé műanyag ömlédekkkel. A feltöltött szakaszok tipikusan nem tartalmaznak szivattyúzó elemeket. Az 1. ábra szemlélteti egy több szellőztetési ponttal ellátott kétszigás extruder csigakiképzését és a hozzá tartozó tömítő elemet. A 2. ábra pedig a tömítéseket, a csiga elemeket és a hozzájuk tartozó nyomásprofil egy tipikus szellőztetett kétszigás extruder esetére. Ebben az esetben a második gáztalanítót egy plusz betáplálási pontként használják, de kialakítása azonos a gáztalanításnál használatoshoz.



1. ábra A tömítő, továbbító és gáztalanító csigaszekciók



2. ábra Tömítések, csiga elemek és a kapcsolatos nyomás profil egy tipikus szellőztetett kétcsigás extrudernél. Ebben az esetben az egyik gáztalanító szakaszt adalékok betáplálására használják, a kialakítása azonos a másikéval

A hátsó, vagy felső áramlási szakaszú tömítést semleges, vagy riverz kompaundáló elemekkel, egy hengerrel, vagy más gátló elemekkel oldják meg a csiga(ko)n úgy, hogy a levegő ne haladjon az extruder hátsó részéből a gáztalanító (DV) zónához. A semleges, vagy riverz elemek arra kényszerítik a csigát, hogy teljesen feltöltődjön a tömítésnél, nyomást generálva a tömítésen át az anyag továbbításához. Ez elszigeteli a DV zónák vákuumát az etető toroktól, vagy az extruder más zónáitól.

A gáztalanító zóna másik végét lezáró tömítő szakasz kialakítása hasonló; és egy egyszerű kétszigás extruder vagy egyszigás extruder esetében a szerszámon átfolyó ömledék látja el ezt a feladatot. A cél az, hogy meggátoljuk a vákuumot abban, hogy a csiga mentén végig hatolva csökkentse a gáztalanítás teljesítményét. Az extruder típusától, hosszától és funkcionális zónáitól függően, egy gáztalanító szakasz hátsó tömítése vagy a megömlesztő zónából táplálható, vagy pedig egy keverő, kompaundáló, vagy gáztalanító működésből. Az extruder vége irányába működő tömítés lehet a maga a szerszám, vagy a feltöltő zóna egy másik gáztalanító, vagy beadagoló szakaszhoz.

Az extruder vége felé eső tömítés kialakítása némileg problémásabb, mivel lehet túl szoros, vagy túl közel eshet a gáztalanító szakaszhoz, az átvitt anyagmennyiség lehet túl sok, vagy a csiga sebesség túl alacsony, a csiga, vagy csigák kitöltött része visszaáramolva a gáztalanító nyíláson át, eláraszthatja azt, és eltömheti a nyílást és a vákuumvezetékét.

Kétszigás extrudernél a csiga fordulatszámának változásai megváltoztathatják a tömítés stabilitását

Fontos, hogy a gépet működtető személyzet megértse azt, hogy hogyan reagál a gáztalanítás a működési paraméterekre. Változásai egy kétszigás extrudernél befolyásolják a tömítések stabilitását. A csigasebesség növelése lerövidíti a kitöltött szakasz(ok) hosszát mind a hátsó, mind az elülső tömítéseknél, és ezért érzékenyebbé teszi ezeket a tönkremenetelre. A csigasebesség csökkentése viszont növeli a kitöltött szakaszok hosszát valamennyi tömítésnél. Ez az elülső tömítésnél növeli annak veszélyét, hogy az ömledék elárasztja a gáztalanítót.

Önálló művelet, vagy a termék tulajdonságok javítása

A gáztalanítás lehet egy önálló műanyag-feldolgozási művelet, melynek során a polimerömledéket elválasztják egy oldatból, de lehet egy olyan művelet is, amikor az ömledékben nyomokban előforduló illékony anyagok eltávolításával a termék tulajdonságait javítják, vagy pedig megszabadják azt az egészségre ártalmas vegyületektől.

Az önálló műanyag-feldolgozási műveletnél a gáztalanítás egy hatékony eljárás arra, hogy elválasszák a polimert egy illékony oldószertől, vagy a nem teljesen végig futtatott reakcióból visszamaradó monomertől. Az olyan polimerek széles köre esetében, amelyek erősen exoterm reakcióval polimerizálódnak (pl. sztirol-féleségek, akrilátok tömbpolimerizációja) a polimerizációt oldószerben, vagy monomer feleslegben végzik, amellyel kényelmesen kontrollálhatják a reakcióhőt. Tipikusan ezeket a reakciókat 40–60% konverzióig futtatják egy kevert reaktorban, ezt követően pedig leválasztják és reciklálják a monomert, vagy az oldószert, amelyet újra felhasználhatnak.

Az elegyet általában egy több (2–4) gáztalanító szakasszal ellátott extruderbe táplálják be, vagy egy elpárologtató egység után kapcsolnak egy ilyen extrudert. E módszerekkel az oldószer koncentrációt közel zérusra lehet csökkenteni.

Ahogy az 1. ábra mutatja, a reaktorból szirupszerű konzisztenciájú anyagot táplálnak be a kétszigás extruderbe, amely négy gáztalanító szakasszal van ellátva. A csigás extruderek előnye más oldószer leválasztó módszerekhez képest az, hogy a csiga forgása folyamatosan és egyenletesen újra felmelegíti a polimert minden gáztalanító szakasz után.

Ökölszabályként elfogadható, hogy minden egyes gáztalanító szakasz egy nagyságrenddel csökkenti az illó anyagok koncentrációját. Így például egy három gáztalanító szakasszal ellátott extruder a betáplált 50% oldószertartalmat bőven 0,1% alá csökkenti.

A cél a csekély illóanyag-tartalom elérése

A gáztalanítást szinte mindig a kilépéshez közel helyezik el az extrudereknél (vagy a fröccsöntő gépeknél), hogy csökkentsék az ömledékben visszamaradó illékony anyagok koncentrációját. Ez többféle okból is fontos lehet. Az első és legfontosabb ok az, hogy a visszamaradó oldószerek, monomerek, vagy más illékony szennyeződések gyakran károsan befolyásolják a műanyag termékek fizikai tulajdonságait, megjelenését, stabilitását, vagy öregedését. Az ilyen illékony maradékok megváltoztatják a termékek színét és/vagy csökkentik időjárás-állóságát és hosszú távú szilárdságát.

A hatósági előírásoknak történő megfelelés gyakran igényli a műanyagokban lévő szennyeződések szintjének egy határérték alá csökkentését, különösen az élelmiszeripari, gyógyászati, vagy az emberi testtel érintkező termékeknél. *Általában, minél kevesebb a visszamaradó szennyeződések koncentrációja, annál biztonságosabbak és tartósabbak lesznek a termékek.*

A tömbpolimerizációval előállított polimerekkel ellentétben, ahol az illó anyagok eltávolítása egy önálló technológiai lépés, a lépésenkénti polimerizációval előállított polimerek (pl. poliamidok, PET, stb.) esetében sokkal kisebb az esélye a reakció termikus megszabadásának, a gáztalanítást a visszamaradó monomerek és a polimerizáció során visszamaradt más kis molekulák eltávolítására használják.

Elméletileg lehetséges a műanyagömledéket az összes illékony anyagtól megszabadítani. Ennek azonban két gyakorlati akadálya van. Ezek egyike az, hogy bizonyos polimerek hajlamosak depolimerizálódni magas hőmérséklet és huzamosabb tartózkodási idő esetén. Teljesen normális, ha jól kialakított vákuumgáztalanítás és csiga geometria esetében is növekszik az illékony maradékok koncentrációja, ha a depolimerizáció sebessége meghaladja a gáztalanítást. Többféle lehetőség van azonban arra, hogy ezt a jelenséget visszaszorítsuk

A másik gyakorlati korlátot a polimer bomlása jelenti a nagy nyírási feszültségek és hőmérsékletek hatására. Gyenge színtabilitás, lánc-tördelődés, elágazási reakciók és más degradációs formák következhetnek be, ha erőltetjük a gáztalanítási teljesítményt. Tulajdonképpen a visszamaradó illékony anyagok koncentrációját kell viszonyítani azokhoz a hatásokhoz, amelyeket a polimer károsodása okoz.

A gáztalanítás természetesen nem távolítja el a nem illékony szennyeződések. A nagyobb molekulák, mint a dimerek és trimerek, amelyek magas forráspontúak, és/vagy alacsony tenziójúak, nem távolíthatók el gáztalanítással. Ilyenkor extrakciót, vagy reakciós eljárásokat kell alkalmazni.

A gáztalanítás hatékonyságát több tényező befolyásolja: az extruder kialakítása és a termodinamikai változók.

A gáztalanításra alkalmas gép paraméterei

A gáztalanítás során a polimer oldatból az oldószereket, vagy a műanyagömledékből a benne feloldott illékony anyagokat lehet eltávolítani. Az erre alkalmas berendezések nagyon

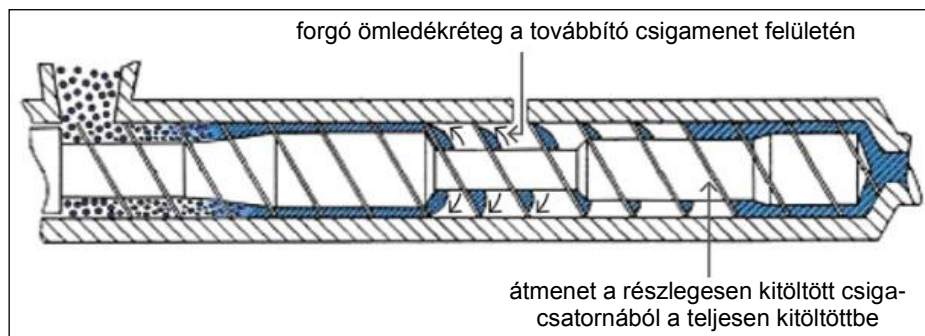
sokfélék lehetnek, a lehulló folyadék film elgőzölögtetőktől a több csigás extruderekig terjedően, de az eljárás elve nem változik. Egy gőztért kell kialakítani a polimer oldat, vagy ömledék felett, és mechanikai eszközökkel kell regenerálni a felületet. A gőztérben olyan körülményeket kell teremteni, amelyek elősegítik az illékony anyagok eltávozását az oldatból, vagy az ömledékből.

Noha nem könnyű számszerűsíteni a gáztalanítási folyamatot, az bizonyos, hogy e tényezőket mechanikai és termodinamikai csoportokba lehet sorolni. A mechanikai tényezők a berendezés kialakítási paramétereinek függvénye, amelyek három fő részre tagolódnak:

- a felület nagysága és a regeneráció sebessége,
- tartózkodási idő,
- elosztó keverés.

A nagyobb felület természetesen gyorsabb elpárologtatást eredményez, amit egy megfelelően nagy koncentráció gradiens tovább növelhet.

A felület regenerálásának hatását a 3. ábra segítségével érthetjük meg. Az egycsigás extruder metszeti képén a szellőző zóna előtti és utáni zónáknál a menetek teljesen fel vannak töltve, míg a szellőző zónában csak részlegesen. A csiga forgása révén az illékony anyagok kigőzölgését lehetővé tevő felület folyamatosan megújul, regenerálódik. A kis mólsúlyú anyagok viszonylag kis diffúzió sebessége miatt ugyanis csak azoknak a molekuláknak van esély kijutni a felületre, és így elpárologni, amelyek a felületközeli rétegben vannak.



3. ábra Egycsigás, gáztalanító zónával ellátott extruder, ahol az ömledék forgó mozgásával a párologtató felület folytonosan megújul

Az egy- és a kétszigás extruderek gáztalanító zónáját úgy alakítják ki, hogy a keverés minél intenzívebb, és a tartózkodási idő minél hosszabb legyen. Ezért a csigamenetek csak részlegesen töltődnek ki és lamináris áramlást eredményeznek, ezért a friss anyag felszínre hozatalát csak intenzív lamináris keveréssel lehet elérni. Többszörös és meredekebb, továbbá megszakított menetek mind azt szolgálják, hogy minél több friss anyag kerüljön a felületre.

Természetesen fontos az is, hogy az illékony anyagok buborékot képeznek-e a felületen, vagy anélkül távoznak a gőz/gáz fázisba a felületről. Egy egyszerű képlettel írható le az egy-ségnyi idő alatt képződő felület a csatornák számának, geometriájának és a csigasebesség függvényében. Fontos, hogy ne feledkezzünk el a csigaház felületén kialakuló műanyag réteg felületéről sem.

Ezek az egyszerű összefüggések megmutatják, hogy a felületgenerálás növekszik a csatornák számával, a csigasebességgel és csökken a csatorna feltöltöttségével. A menetemelkedés általában olyan, hogy az egy csigafordulatnál a csiga átmérőjének felel meg, de ez növelhető, hogy javítsuk a felületképzést. Ez az alábbiak szerint ágyazódik be a Z zóna hélikus hosszába:

$$SA_c = (V_y) \times (nZH) \text{ (felület/egységnyi idő a csatornában)}$$

$$SA_b = (1-f)W \times nZ \times N \text{ (felület/egységnyi idő a csigaház felületén)}$$

ahol:

W:	csatornaszélesség
f:	töltöttségi arány
Z:	a zóna hélikus hossza
N:	csigasebesség
n:	a csatornák száma
H:	csatorna mélység
V_y :	a forgó anyagtömeg felületi sebessége

Hasonló összefüggéseket lehet felállítani a tartózkodási időre a zónában, ami hozzájárul mind a keveredéshez, mind pedig a felületgeneráláshoz. Minél tovább tartózkodik a polimer a gáztalanító zónában, annál több illékony anyag képes távozni.

Termodinamikai értékek

A termodinamikai változók optimalása arra szolgál, hogy maximálják a hajtóerőt arra, hogy az illékony anyagok elhagyják az ömledéket, vagy az oldatot és bejussanak a gőztérbe.

Míg a termikus energia egyike a légneművé válás elsődleges hajtóerőinek, a túl magas hőmérséklet, túl sokáig alkalmazva károsítja a polimert, vagyis oxidatív degradációt okoz.

A kontrolláló termodinamikai mechanizmusok változnak, ahogyan az illékony komponensek koncentrációja változik. Az oldószer, vagy a monomer nagyon magas koncentrációi a forrási folyamathoz hasonló módon viselkednek. Itt a meghatározó mechanizmus az, hogy hőt viszünk be az ömledékbe, vagy oldatba, és lehetővé tesszük a komponensek gyors szétválását. A csiga kialakításának itt csak csekély szerepe van, legfeljebb a habosodás visszaszorítása és annak meggátlása, hogy polimerömledék kerüljön a gáztalanító nyílás(ok)ba.

Ahogyan az illékony anyagok koncentrációja lecsökken, a párolgást egyre inkább a diffúziós mechanizmus kontrollálja. A szakirodalomban sok szó esik a túlhevítésről, amikor elegendő energiát kell bevinni a halmazállapot-változás hőjének kompenzálásához, stb., ez azonban ritkán a korlátozó lépés, és nem más, mint a kezdeti szellőztetési művelet az alacsony szilárdanyag tartalmú betáplálásnál. Ehelyett, a kontrolláló mechanizmus a korábban már említett felületgenerálás, összekötve az illékony komponensek parciális nyomásával.

A parciális nyomás kritikus paraméter annak előrejelzésében, hogy hogyan lép ki a gáz/gőz a polimerömledékből. A gázok/gőzök igyekeznek kiegyenlíteni nyomásukat a két érintkező fázisuk között. A gáz/gőz arról a felületről, ahol parciális nyomása nagyobb, igyekszik átkerülni arra, ahol parciális nyomása kisebb. Minél nagyobb a nyomáskülönbség, annál gyorsabb lesz az áramlás.

Az illékony komponens átjutása a műanyagömledékből a gőztérbe attól függ, hogy az anyag mennyire oldható a polimerben, és attól, milyen nagy a parciális nyomása az ömledék

felett, a gőztérben. Ezt az alapvető összefüggést írja le a *Henry törvény*, amely azt állítja, hogy egy gáz koncentrációja a folyékony fázisban egyenesen arányos oldhatóságával és parciális nyomásával. Minél magasabb a parciális nyomása és oldhatósága, annál több molekula marad feloldódva a folyadékban. Szivárgások, túl alacsony vákuumszintek, vagy éppen a nem megfelelő vákuumszivattyúk drámaian lecsökkenthetik a gáztalanítás hatékonyságát.

A *Flory-Huggins egyenlet* írja le azt az összefüggést, amely az ömledék feletti gőztér nyomása, és aközött van, hogy az illékony komponens mennyire akar az ömledékben maradni. Noha sem a Flory Huggins, sem a Henry törvény nem alkalmazható direkt módon egy gáztalanító zónára, mégis hasznos kvalitatív ismereteket adnak:

$$\log(P_1/P_{01}) = \log(1-V_2) + V_2 + XV_2^2$$

ahol:

- P_1 : A gőznyomás az ömledék felett
 P_{01} : A tiszta anyag gőznyomása az adott hőmérsékleten
 V_2 : A polimer térfogata a bináris elegyben
 X : A Chi, vagy Flory-Huggins paraméter

A termodinamika oldaláról, minél több illékony komponens kívánunk eltávolítani az ömledék feletti gőztérből. Ebből az következik, hogy:

- a körülményeknek megfelelő lehető legnagyobb lehetséges vákuumot alkalmazzuk,
- belső öblítő gázt (nitrogént) használunk, hogy tovább csökkentsük az illékony komponens(ek) koncentrációját az ömledék felett,
- energiát viszünk be az ömledékbe, hogy kompenzáljuk a gőzzé alakulás hűtő hatását.

A matematikai képletek helyett egyszerű ökölszabályokat használhatunk:

- maximalizáljuk az elgőzölögtetési felületet és annak regenerációját,
- a részlegesen kitöltött csatornáknál minél nagyobb elosztató keverést biztosítunk,
- csökkentsük az illékony komponensek koncentrációját az ömledék feletti térben minél nagyobb vákuummal és esetleg öblítőgázzal,
- több lépésben végezzük a gáztalanítást (több gáztalanító zóna), a kontroll mechanizmusok szerint optimalva azokat,
- tartsuk alacsonyan a viszkozitást, hogy minimalizáljuk a degradációt,
- tartsuk távol az oxigént a rendszertől, hogy minimalizáljuk a degradációt

A gyakorlati dolgok fontossága

Számos olyan gyakorlati megfontolást kell figyelembe vennünk, amelyek befolyásolják az eredményes gáztalanítást. Ezek közül a legfontosabbak közé tartozik a megfelelő számú gáztalanító zóna kiválasztása, az illó anyagok forrásba hozásának elkerülése, az intenzív párolgás által lehűtött polimer ömledék visszamelegítése.

- *Az illékony anyagok forrásba hozatala.* Amikor az illékony anyagok elpárologtatása túl gyors, az anyag „felforr”, szignifikáns mennyiségű buborékot és habot képezve. Ahogyan az oldat nyomásesése megtörténik, a gőz felszabadul, és a buborékok kipukkadnak, ami a halmazállapot változás miatt jelentős hőmérséklet-csökkenést eredményez. Ennek gyakran az lesz az eredménye, hogy a hab megszilárdul és leszakadva a csigá(k)ról bekerül az elszívó rendszerbe ennek összes káros következményével. Ennek elkerülése érdekében a hátsó tömítő szakasz után elegendő csigahosszt

kell hagyni a gáztalanító nyílás előtt, hogy a csiga forgása összetörje a megszilárduló habot és a mechanikus energia újra felmelegítse a polimert.

- *A polimer visszaáramlása a gáztalanító nyíláshoz.* Ez annak az eredménye, ha a gáztalanító nyílás utáni csigaszakaszban nincs elég menetszám, mielőtt a menetek teljes feltöltése megtörténne. Ennek elkerülése érdekében növeljük meg a forgási sebességet, használjunk sekélyebb csigacsatornát (nagyobb nyomásnövekedés), vagy növeljük meg a csigaszakasz hosszát a gáztalanító nyílás és a csiga vége felé eső tömítő szakasz között.
- *Termikus regeneráció.* Nagy mennyiségű illékony anyag eltávolítása szignifikánsan lehűti az ömledéket, talán nem annyira, hogy megszilárduljon, de annyira mindenképpen, hogy a további elpárolgást gátolja. Ezért a gáztalanító nyílás utáni csigaszakaszt úgy kell kialakítani, hogy a mechanikai, nyírási energia újra felmelegítse az ömledéket, hogy azután a következő gáztalanító zónában újra megfelelő mértékű legyen az illékony anyagok elpárolgása.
- *Nem elég nagy vákuum.* Szívárgás, eredetileg sem elég nagy vákuumszint, vagy a nem megfelelő típusú vákuumszivattyú drámaian lecsökkentheti a gáztalanító hatékonyságát. Ez az eredménye, ha minden figyelmünket az extruderre fordítjuk és elhanyagoljuk a segédberendezések állapotát, amelyek pedig ugyanolyan fontosak a jó eredményhez.
- *Túl nagy hatás elvárása egy gáztalanító zónától.* Egy gáztalanító zóna nem képes túl nagymértékben, vagyis egy nagyságrendnél jobban lecsökkenteni az illékony anyagok mennyiségét az ömledékben. Ezért ha ennél nagyobb hatásra van szükség, akkor több gáztalanító zónát kell kialakítani.
- *Új illékony anyagok generálása.* Az extrúziós folyamat során bekövetkezhet a polimer degradációja. Kerüljük a túl magas hőmérsékleteket és az oxigén bejutását a rendszerbe. A szerszámhoz legközelebb eső gáztalanító zónát és elszívó rendszert úgy alakítsuk ki, hogy az a legnagyobb teljesítményt nyújtsa. Ez az egész extruderben csökkenti a viszkozitást és minimalizálja a degradációt.

Amire a gáztalanítás nem képes

A gáztalanítás nem távolítja el a nem illékony szennyezéseket. Nagyobb forrásponttal és/vagy alacsony tenzióval rendelkező molekulák, mint a dimerek és trimerek is ezek közé tartoznak, és ezért csak extrakcióval, vagy reaktív eljárásokkal távolíthatók el.

Összeállította: Dr. Füzes László

Jerman R.: *Compaunding: Part 1 of 2: Demystifying Devolatilization = Plastics Technology*, 2020. márc. <https://www.ptonline.com/blog/post/part-1-demystifying-devolatilization>

Jerman R.: *Compaunding: Part 2 of 2:*