

## Tanácsok és ötletek az extrudálás területéről

Bonyolultabb alakzatok esetén az áramlási számítások rendkívül nehézkessé válhatnak. Az extruder meghajtójának méretezésekor a polimer fajhőjének ismerete segít meghatározni a berendezés teljesítményét. Az ömledékhőmérséklet és a szerszámfej nyomás együttesen befolyásolja az extrudersor teljesítményét. Az in-line spektrofotométer a szint közvetlenül az extrudersornál méri és szabályozza. Az együtt forgó ikercsigás extruderek a biopolimerek kiváló keverését biztosítják.

*Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás, extrudálás, extruder szerszám, szerszámtervezés, csigatervezés, fajhő, szerszámfej nyomás, színszabályozás, biopolimer extrudálás*

### Profil extruder szerszámtervezés

A polimer ömledék áramlásának kiszámítása viszonylag egyszerű, ha körprofilhoz tervezünk szerszámot, de bonyolultabb alakzatok esetén ezek a számítások rendkívül nehézkessé válhatnak. Az ömledéknek szilárdan kell tapadnia a szerszám falához, mivel a csúszás ömledéktörést okozhat. Ez jelentős hatással van a szerszám kialakítására és fontos a szerszámproblémák elhárítása során is. Amint az ömledék kilép az extruderből és belép a szerszámba, ahogy a csiga vagy az ömledékszivattyú átnyomja a szerszámon, a szerszámrésben nyíróhatásnak van kitéve.

A kör alakú profil átmérője valamivel kisebb, mint a szerszám keresztmetszete (a polimer duzzadását figyelmen kívül hagyva) az ömledék falhoz tapadása miatt, viszont az alakja nem változik. Egy egyszerű téglalap alakú profilnál a négyszögletes sarkokat nem tölti ki az ömledék, mert a sarkoknál lévő többletfelület az áramlást lassítja, ami lekerekítheti a sarkokat. A profil alakját tekintve a nyírófeszültség mindig nulla az áramlás középpontjában, míg a legnagyobb nyírófeszültség a szerszám falánál jelentkezik és az áramlási középponttól való távolsággal arányosan nő. Az eltérő nyírás miatt a nyírófeszültség változása önmagában kis viszkozitás különbségeket hoz létre, és minél összetettebb a profil, annál összetettebbek a hatások is.

Bonyolultabb szerszámban az áramlási változások összetettebbek, ezért a szerszám belső csatornáinak kialakítása gyakran eltér az extruderből való kilépéstől a szerszám vége felé haladva. A szerszám minden felületét egyenletesen kell felmelegíteni, hogy a falak mentén a viszkozitás ugyanolyan nyomásesést biztosítson, így a profil „szögletes” marad a szerszámból kilépve is. A szerszám nem kiegyensúlyozott felmelegítése a falhoz közel torzíthatja az alakot a viszkozitás változásával, ami sokkal hangsúlyosabbá válik az összetettebb profilú szerszámoknál.

Szerencsére ma már számos szimulációs program segíti a szerszámtervezést, így akár több száz órát is meg lehet spórolni egy összetett profil összes változójának kiszámítása során. Fontos megjegyezni, hogy a szerszám belső kialakítása valószínűleg nem másolja le teljesen a végleges profilalakot. A szerszámban lévő áramlások alapvető ismerete segít, ha problémák merülnek fel a szerszámokkal. Először az ömledékhőmérséklet és a szerszám felmelegítés egyenletességének

nyilvánvaló változásait kell figyelni. Meglepő módon még a kihozatal módosítása is befolyásolhatja a profil alakját, ha minden más megfelelőnek is tűnik, mivel kihat az ömledék viszkozitására az ömledék hőmérsékletének változása miatt, és ez hatással van az áramlás egyensúlyára az összetett profil különböző részein.

## A fajhő jelentősége a csigák és extruderek tervezésében

A csigák tervezésekor számos polimer fizikai tulajdonságait veszik figyelembe. Az egyik ilyen jellemző a polimer fajhője. A fajhő az az energiamennyiség, amely egy tömegegység hőmérsékletének egy fokkal történő megváltoztatásához szükséges, leggyakrabban  $J/g/^\circ C$  mértékegységet használnak a tervezéskor. Szokásos jelölése a legtöbb képletben  $C_p$ . Példaként említhető, hogy a PET-tel összehasonlítva több mint kétszer annyi energia kell egységnyi tömegű HDPE hőmérsékletének  $1^\circ C$ -kal való emeléséhez.

Új csiga tervezésekor az egyik első szempont annak meghatározása, hogy elegendő teljesítmény áll-e rendelkezésre a kiválasztott polimerrel a tervezett kihozatalhoz. Amikor a csiga forogni kezd, akkor a polimerek rossz hővezető-képessége miatt szinte az összes teljesítmény, ami a megömlésztésre vagy a polimer hőmérsékletének emelésére fordítódik, a meghajtásból érkezik. Nem szabad ugyanakkor elfelejteni, hogy egyes polimereket feldolgozás előtt előmelegítenek a nedvesség eltávolítása miatt, ezért kisebb lesz a különbség az extruderbe való belézési hőmérséklet és az olvadási hőmérséklet között, mint előmelegítés nélkül.

Fontos szem előtt tartani, hogy a kereskedelmi igények változása miatt egy kis teljesítményigényű polimerhez, például PET-hez méretezett extrudálósor vásárlása korlátozhatja az extruder későbbi használhatóságát. A fajhő, az ömledékhőmérséklet és az előmelegítés közti különbségek miatt jelentős eltérések lehetnek a szükséges hajtási teljesítményben. A PET-hez képest a HDPE-nek közel háromszor annyi meghajtó teljesítményre van szüksége, hogy elérje a jellemző feldolgozási hőmérsékletét, mivel a PET esetében számításba veszik a fajhőt és az előmelegítést is.

## A szerszámfej-nyomás becslése és szabályozása

Az ömledék hőmérséklete mellett nem hagyható figyelmen kívül a szerszámfej-nyomás sem, mert a kettő szorosan összefügg és befolyásolja az extrudersor teljesítményét. A falnál a nyírófeszültségnek elég nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy biztosítsa az anyag folyamatos megújulását, nehogy lerakódás vagy statikus réteg alakuljon ki. Az ömledékhőmérséklet nyitott kilépésnél egyedül az extrudertől függ, és a csiga kialakítása és sebessége, az  $L/D$  arány, a polimer tulajdonságai, a csiga és a henger állapota, valamint a henger fűtésének/hűtésének hatékonysága határozza meg. Ez tulajdonképpen egy alaphőmérsékletnek tekinthető, amely az extruder egy vagy több paraméterének módosításával változtatható.

Amikor fejnymást alkalmazunk az extruder végén, az ömledék hőmérséklete a nyomás növekedésével nem lineárisan emelkedik az alaphőmérsékletéről. Ez a nyomásáram kaszkád hatásának köszönhető, a kihozatal a csigától a fejnymás növekedésével csökken. Ahogy a csiga tovább forog a kisebb kihozattal, a nyírófeszültség hatására a polimerbe jutó energia növekszik. A növekvő energiabevitel az ömledék hőmérsékletének emelkedését és a polimer viszkozitásának csökkenését eredményezi, tovább növelve a nyomásáramot és csökkentve a kihozattal. Tehát az ömledék hőmérséklete összefüggésben áll a fejnymással, csökkentett kihozattal, nagyobb energiafelvételt és hűtési igényt, esetleg polimer tulajdonság romlást eredményez. Ez magasabb gyártási költségekhez vezet, és szükségtelenül veszélyezteti a teljes rendszer teljesítményét.

Az ömledékszivattyú ennek a hatásnak a nagy részét korrigálni tudja, ha olyan fejnyomást tesz lehetővé, amely általában sokkal alacsonyabb, mint a maximális fejnyomás. Számos eljárás azonban nem tolerálja az ömledékszivattyú használatát töltőanyagok adagolása esetén, valamint a polimer degradációjának és szennyeződésének lehetősége miatt. Ezekben az esetekben az utóműveletek szerszámainak kialakítása fontos tényező az extrudersor teljesítménye és jövedelmezősége szempontjából. Sajnos gyakran nem veszik figyelembe a fejnyomás hatásait ezen komponensek kiválasztásakor.

Megfelelő tervezéssel a fejnyomás pontosan megbecsülhető és szabályozható. Ez többnyire olyan egyszerű dolgokat foglal magában, mint például az áramlási csatornák megfelelő méretezése a várható kihozatalhoz, az adapterek és az áramlási csövek hosszának korlátozása, a szita-váltó megfelelő méretezése, a polimer tulajdonságaihoz megfelelő szerszám kialakítás és az alakadó egységek megfelelő fűtése.

Az áramlási csatornák legegyszerűbb kialakításban kör, rés és gyűrű alakúak, melyek számításához a newtoni egyenletek egyszerű közelítésként használhatók. Adott polimerre ehhez meg kell határozni megfelelő hőmérsékleten a viszkozitást a nyírási sebesség–viszkozitás görbék alapján. A newtoni elemzés ugyanakkor figyelmen kívül hagy néhány viszkoelasztikus hatást, például a viszkozitásból származó felmelegedést a falnál. A nyírási sebességet ki kell számítani, majd a feldolgozási hőmérsékleten alkalmazni kell a nyírási sebesség–viszkozitás görbékre, hogy megkapjuk a viszkozitást. Ezek közelítő értékek, amelyek alkalmasak a berendezés kiválasztására és megmutatják a fontos változók hatásait komolyabb számítógépes elemzés nélkül.

A lerakódások vagy a statikus réteg kialakulásának elkerülésére a falnál lévő nyírófeszültségnek elég nagyoknak kell lennie (jellemzően 0,07 MPa) ahhoz, hogy a fal közelében az anyag folyamatos megújulását biztosítsa. A túl kis nyírófeszültség a falnál hőmérséklet különbségeket épít fel az extrudátumban a tartózkodási idő nagy eltérései miatt és instabil áramlást okoz. A hőérzékeny polimereknél ez degradációhoz is vezethet.

Az alakadó szerszámok megfelelő fűtése fontos része a fejnyomás szabályozásának. A szerszám hőmérsékletét a lehető legközelebb kell tartani az ömledék hőmérsékletéhez. Ez megakadályozza a hidegebb, viszkozusabb polimer lerakódását vagy statikus réteg kialakulását a belső falakon, ami egyszerűen leszűkíti az áramlási csatornát és növeli a nyomásesést. Nehéz csökkenteni az ömledék hőmérsékletet a szerszám hűtésével a fejnyomás növelő hatása és a polimer rossz hővezető-képessége miatt. Új profil extrudálósor összeszerelésekor mindig figyelembe kell venni a becsült szerszám fejnyomást a kihozatali és hűtési számításoknál.

## Szín szabályozás

Az **Equitech** cég in-line spektrofotométere a színt közvetlenül az extrudersornál méri és szabályozza, csökkentve ezáltal a hulladékot és javítva a minőséget. Az *Inline Process Spectrophotometer* (IPS) névre keresztelt rendszer egy beépített ultraibolya-látható fény spektrofotométerre épül, amely masszív, közvetlenül az ömledékáramban elhelyezett szálóptikai szondákkal felszerelt, így szükségtelenné teszi a manuális mintavételt. Mivel az Ipar 4.0 a gyártóhelyeket a fokozott számítógépes vezérlés felé tereli, szükség van valós idejű mérésekre a jobb termékminőség és konzisztencia érdekében. Ideális esetben egy folyamatmérő rendszer adatokat szolgáltat a termékminőségi mutatókról, amelyek segítségével azonnal és automatikusan beállíthatók a gyártási paraméterek a legmagasabb minőség megőrzése érdekében anélkül, hogy meg kellene várni, amíg a mintaelemzés visszaérkezik a laboratóriumból. A laboratóriumi eredmények

kézhezvételésnek késése azt jelentheti, hogy nagy mennyiségű, a specifikációnak nem megfelelő anyag kerülhet legyártásra a minőségi probléma észlelése előtt. Ez növeli a termelési költségeket, a rossz terméket el kell különíteni, ami hulladékkezelési problémát is okozhat.

Az Equitech technológiája gyakorlatilag minden műanyagipari folyamatban használható, de a legjobban az extrudáláshoz illeszkedik. Az extrudálás során a hőmérséklet, a nyomás, a csiga sebesség mérése mindennapos. A hiányzó információ a termékminőség in-line meghatározása. Az ultraibolya-látható fény (UV-vis) spektroszkópia kiváló módszer ezen információk megszerzésére. Az eszköz a termék színének mérésével érzékeli az anyag adagolási sebességének változásait, a csigakopást, a termék hőmérséklet ingadozások miatti degradációját.

Az IPS a következőképpen működik:

- A megvilágító fényt egy fényforrás (például xenon kisülési lámpa) állítja elő, és száloptikán keresztül továbbítja az érzékelőhöz.
- A fény kölcsönhatásba lép a mintával (visszaverődés vagy áteresztés).
- Az érzékelt fény száloptikán keresztül jut vissza a spektrofotométerhez.
- A spektrofotométer a fényjelet (spektrumot) elektronikus jellé alakítja.
- Az elektronikus jel kiszámítja a színmérési értékeket.
- Az eljárás 1–30 másodpercenként megismétlődik.

A technológia három változatban érhető el. Riasztási módban – ez a legegyszerűbb és legegyszerűbb megoldás – a műszer a probléma észlelésére és a riasztás aktiválására szolgál, ha bármely szín vagy összetételi (pl. stabilizátor adalék) jellemző eltér a specifikációtól. Ezután a kezelő feladata, hogy azonosítsa az eltérés forrását és megfelelően eljárjon. A valós idejű minőségbiztosítás riasztórendszerrel kombinálva egy szín vagy összetételi jellemző valós időben történő monitorozására szolgál, hogy folyamatosan biztosítsa a termék minőségét vagy az összetevők szükséges arányát a teljes gyártási folyamat során. A zárt hurkú szabályozás akkor működik, ha a színért (vagy más jellemzőkért) felelős összetevők adagolása valós időben függetlenül szabályozható. Ehhez olyan szoftverre van szükség, amely közvetlen kapcsolatban áll az adagoló és extruder vezérlőrendszerekkel, esetleg az üzemben belüli kommunikációs hálózattal. Az összetevők zárt hurkú termékellenőrzése garantálja a legmagasabb minőséget és termelékenységét, a legkevesebb hulladékot és a legalacsonyabb költséget.

## **Biopolimerek kompaundálása ikercsigás extruderrel**

A biopolimerek, mint pl. a poli(hidroxi-alkanoát) (PHA), gyártási kapacitása várhatóan több mint háromszorosára fog nőni az elkövetkező években. A PHA-k bioalapú poliszterek, amelyek biodegradálhatók, valamint jó fizikai és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. Feldolgozás szempontjából az együtt forgó ikercsigás extruderek kiváló anyagkeverést biztosítanak minden polimerhez, beleértve a biopolimereket is.

A biopolimerek három kategóriába sorolhatók:

- Keményítő alapú polimer kompaundok.
- Más biopolimert, például PHA-t, PLA-t vagy PHB-t tartalmazó biopolimer kompaundok.
- Biopolimer blendek, amelyek két vagy több biopolimert, keményítő alapú polimereket és/vagy kőolaj alapú polimereket tartalmazó kompaundként definiálhatók.

Néhány kulcsfontosságú szempont a biopolimer kompaundok és blendek együtt forgó ikercsigás extruderrel való feldolgozásához:

### *1. Flexibilis extruderek használata*

Hosszú, 48:1 vagy 52:1 L/D arányú extruderek használata több szellőztető és beadagoló nyílással. Ezzel a kialakítással sokkal egyszerűbb megnyitni vagy lezárni egy szellőztetőt, hozzáadni vagy eltávolítani egy oldalsó adagolót, mint egy új hengert vásárolni vagy az extrudert meghosszabbítani.

### *2. A biopolimerek jellemzően higroszkóposak*

Legalább egy (néha kettő) atmoszférikus és legalább egy (néha kettő) vákuum szellőztetőt kell kialakítani az extruderen. Mivel a biopolimerek jellemzően higroszkóposak, ezért a feldolgozás előtt óvatos kezelést igényelnek. Az extrudálási folyamat korai szakaszában hatékony az atmoszférikus szellőztetés a biopolimer hidrolízisének csökkentése és az előszárítás elkerülése érdekében. A vákuum szellőzőnyílás követelmény. Egy jól megtervezett vákuumrendszer beépítése, amely a biopolimerből származó illékony anyagok gyakran korrozív természetét is figyelembe veszi, megtérül a karbantartási és állásidő csökkentésével, valamint a kihozatal növekedésével.

### *3. A biopolimerek nyírás- és nyomásérzékenyek*

A biopolimerek gyorsan lebomlanak, ha túlzott hő- és/vagy nyíróhatásnak vannak kitéve. Az anyag nyírása egyenesen arányos az extrudercsiga sebességével, és fordítottan arányos az extrudercsiga és a henger közötti résmérettel. Az extrudert a lehető legalacsonyabb csigasebességen kell működtetni egy adott kihozatal mellett addig, amíg az extruder forgatónyomatéka túl nagy (>90%) lesz vagy egy térfogati határértéket el nem ér.

A térfogati korlát elkerülhető a levegő és a nedvesség eltávozását biztosító szellőzőnyílások megfelelő, valamint a gyűrő-dagasztó vagy a megfordított csigaelemeknek az adagoló- vagy szellőzőnyílásoktól való lehető legtávolabbra helyezésével. A nagy nyomaték elkerülhető, ha az extrudercsigát hosszú, kímélő keverő zónákkal tervezik, szemben a rövid, intenzív keverőzónákkal. Stabilizálni kell az adagolókat, hogy a nyomaték ingadozása minimális legyen, ami lehetővé teszi, hogy az extruder nagyobb átlagos nyomatékkal üzemeljen.

Az együtt forgó ikercsigás extruder jóllehet hatékony keverőeszköz, szivattyúként csak 8–15%-os hatásfokú, ami az extruder magas kilépőnyomása miatt jelentősen megemelkedett ömledékhőmérsékletet jelent. A magas kilépőnyomás szellőztető áramlást is okozhat az extruder végénél lévő szellőzőnyílásnál. A szerszámfuratok átmérőjének, a szűrősziták lyukméretének, valamint víz alatti pelletizálás esetén a víz és a szerszám hőmérsékletének növelése mind az extruder kilépőnyomásának a csökkentésére szolgál.

Az ömledékszivattyúkat az extruder kimenete és a szerszám között helyezik el, szivattyúzási hatásfokuk 25–35%. Használatuk minimálisra csökkenti az ömledékhőmérséklet emelkedését, megőrzi az extruder teljesítményét és stabilabb extrudátum áramlást hoz létre.

### *4. A biopolimerek gyorsan lebomlanak, ezért fontos az extruder tisztítása*

A biopolimerek lebomlása gyorsabb, mint a legtöbb kőolaj alapú polimeré. Ajánlott csökkenteni a hengerfűtést vagy kikapcsolni, ha az extruder 1–2 óránál tovább áll. Ha a fűtés hosszú ideig bekapcsolva marad, miközben az extruder nem működik, ki kell tisztítani az extrudert egy olcsó hőstabil polimerrel, amelynek az ömledékviszkozitása csak kissé nagyobb, mint a biopolimeré. Ha a tisztítóanyag viszkozitása túl nagy, az a gyártás újbóli beindítása után több órán keresztül szennyeződésként jelentkezhet.

Összeállította: Dr. Lehoczki László

Frankland, J.: Extrusion: Follow These Tips to Get Profile Die Design Just Right – *Plastics Technology*, 2021. 3.

<https://www.ptonline.com/articles/follow-these-tips-to-get-profile-die-design-just-right->

Frankland, J.: The Importance of Specific Heat in Screw and Extruder Design, 2021. 10.,

<https://www.ptonline.com/articles/the-importance-of-specific-heat-in-screw-and-extruder-design>

Frankland, J.: Extrusion: How to Estimate and Control Head Pressure, *Plastics Technology*, 2021. 9.

<https://www.ptonline.com/columns/extrusion-how-to-estimate-and-control-head-pressure>

Callari, J.: System Moves Color Control From Lab to Production Floor, *Plastics Technology*, 2021. 6.

<https://www.ptonline.com/articles/system-moves-color-control-from-lab-to-production-floor>

Elliot, D.: Biopolymer Compounding on a Twin-Screw Extruder: Four Things You Need to Know, *Plastics Technology*, 2021. 5.

<https://www.ptonline.com/articles/biopolymer-compounding-on-a-twin-screw-extruder-four-things-you-need-to-know>