

Energiamegtakarítás az extrúzió során

Habár a műanyag-feldolgozásban az energia ára csak 5%-ot tesz ki a költségek között, napjainkban a gépgyártók fejlesztéseikkel ezt is igyekeznek még lejjebb szorítani. Az extruder energiamérlegének kimérése sokat segíthet gépgyártónak és feldolgozónak egyaránt.

Tárgyszavak: extrúzió; energiamérleg; motorok; meghajtás; szárítás; PET reciklátum; pántolószalag.

Az extrúzió fejlesztésében eddig a legfontosabb cél az volt, hogy javítsák a kihozatali teljesítményt és az ömledék homogenitását. Tekintettel azonban az energiaforrások végességére, az egyre növekvő villanyszámlákra és a fenntartható fejlődés fontosságára, elkezdtek foglalkozni az energiahatékonyság javításával is. Az üzemeltetési költségek csökkentése még alacsonyabb energiaárak mellett is fontos lenne. Az extrúzió folyamatába számos helyen lehet beavatkozni, és már magában a meghajtásban is nagy megtakarítási lehetőségek rejlenek. *A műanyag-feldolgozásban az energia ára kb. 5%-ot tesz ki a költségek között. A megtakarítási lehetőség ideális esetben 20%, azaz a teljes költségek 1%-a. Ez a megtakarítás egyenértékű lenne 12,5%-os nyereségnöveléssel (8%-os nyereséget feltételezve).*

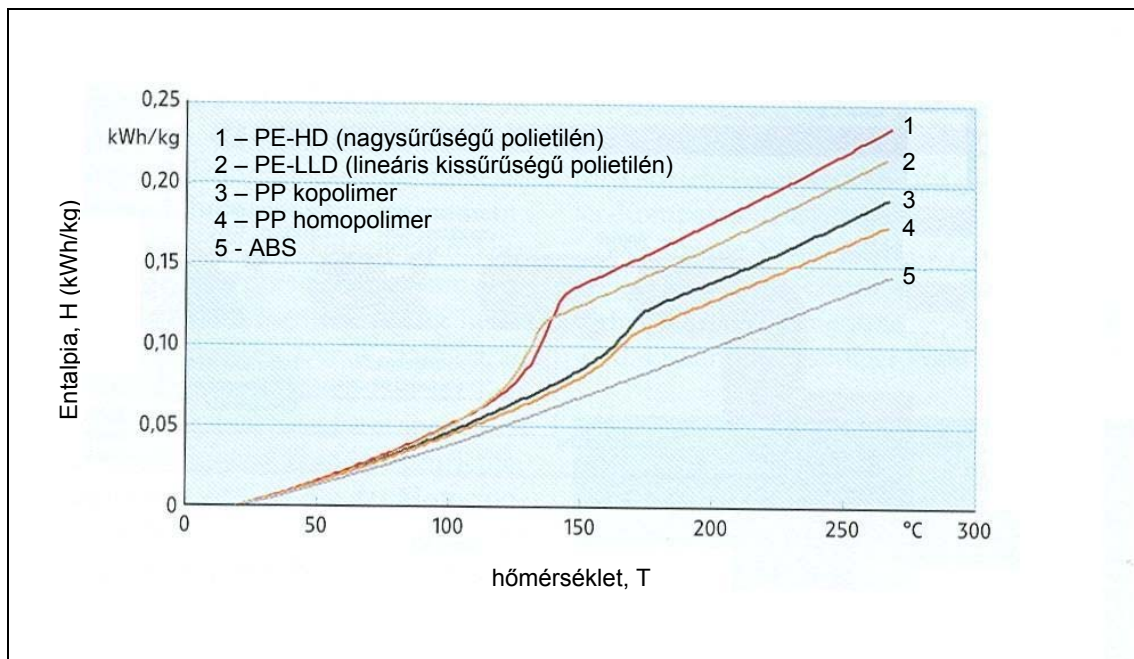
Ahhoz, hogy lássák a megtakarítási lehetőségeket, analizálni kell az extrúziós folyamat energiafelhasználását, azaz meg kell nézni, hogy mi mennyit fogyaszt. Az egyes fogyasztók áramerősségét mérve kiszámítható a felhasznált teljesítmény, ezt kell osztani a tömegárammal, és ekkor kWh/kg egységben megkapják a fajlagos energiafelhasználást. Ehhez lehet hasonlítani a fejlesztések után előálló helyzetet. A műanyagok megömlésztéséhez szükséges energia a fajhő (és esetleges olvadáshő) ismeretében számítható – ezek az adatok pedig differenciális pásztázó kalorimetria (DSC) segítségével megmérhetők (*1. ábra*). A műanyagok feldolgozásakor azonban az elvileg szükségesnél általában jóval több energiát kell felhasználni, és ez nagyrészt a veszteségeknek tudható be.

Energiamérleg komponensei

Extrudáláskor az energiafelhasználás három egymástól nagyjából független részre osztható, amelyek külön-külön is optimalizálhatók. Ezek a következők:

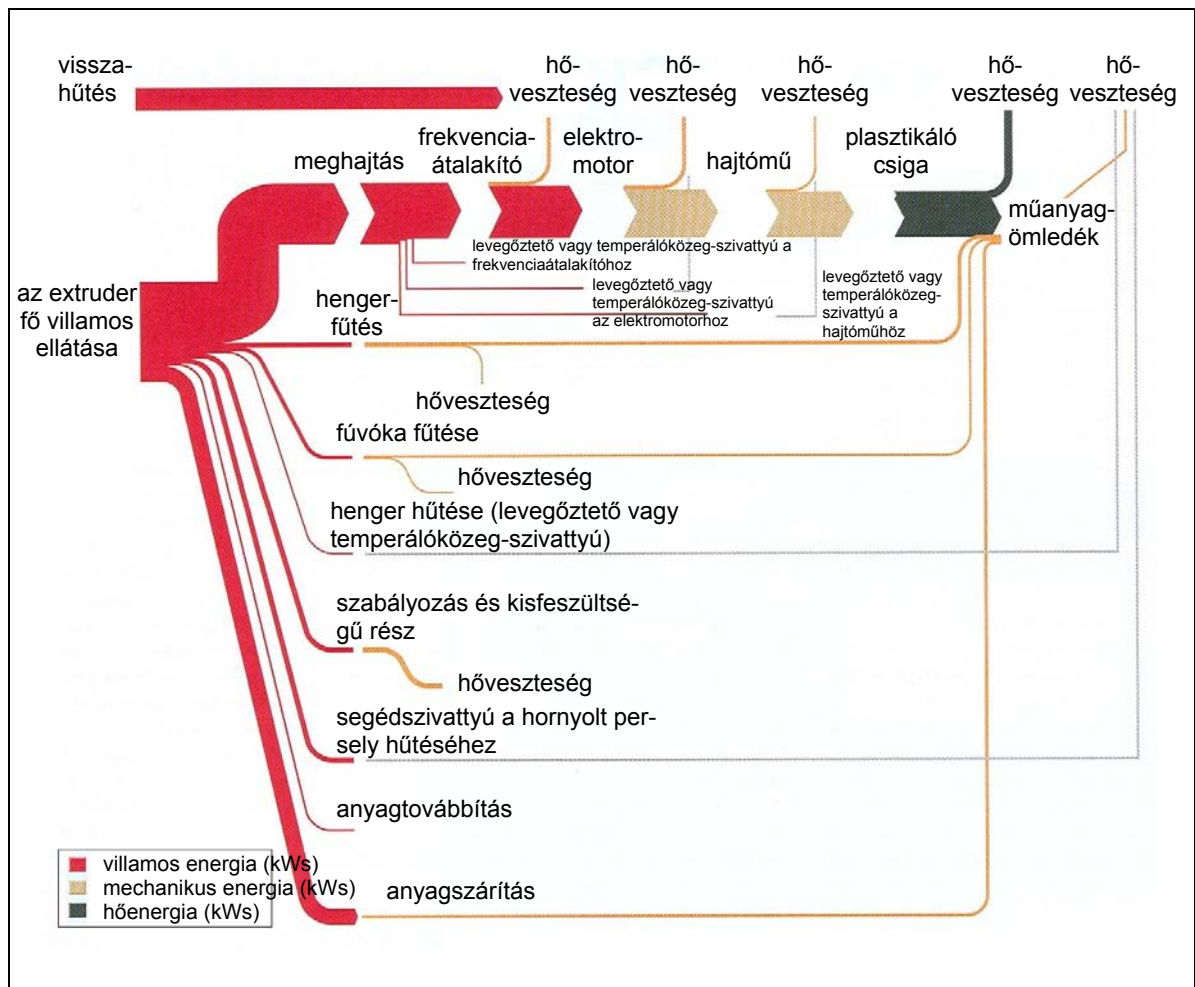
- meghajtás (frekvenciaváltó, villanymotor, meghajtás ellennyomás-szabályzóval és kuplunggal),

- gépvezérlés,
- feldolgozóegység (plasztikáló csiga, henger, hornyolt persely, villamos hengerfűtés, hengerhűtő-szellőztető egység)

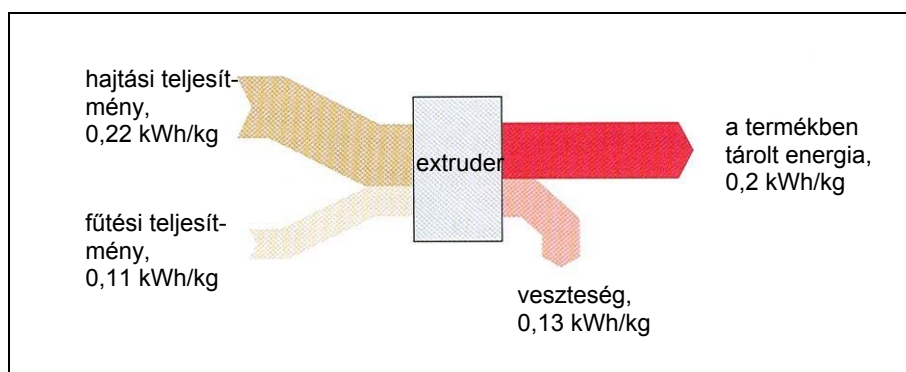


1. ábra Különböző műanyagok entalpiájának változása a hőmérséklet függvényében

Az energiamérleghez definiálni kell az egyes egységek körüli térfogatokat, és meg kell határozni az adott térfogatba bemenő és onnan eltávozó energiaáramokat. A *bevitelt energia* főként villamos energia, amely részben a motoron és a meghajtáson keresztül jut a rendszerbe és a csiga mozgási energiájává alakul, részben pedig a henger fűtésére fordítódik. Mindkettő a műanyagban tárolt entalpiává alakul, valamint az ömledékben tárolt nyomási energiává, amellyel legyőzi a szerszám áramlási ellenállását. Az *elvezetett energia* a hűtési energia (kényszeráramlás – levegő és víz, szabad levegőáramlás, kisugárzott energia). Az energiaáramokat az úgynevezett *Sankey-diagramban* lehet szemléletesen összefoglalni (2. és a 3. ábra). Az ábrából látható, hogy a *legtöbb energiát a meghajtás igényli*. Ez nem csoda, hiszen a műanyag megömlesztése nagyrészt a csiga által okozott nyíróerőnek köszönhető, és az extrúziós szerszám ellenállásának legyőzéséhez szükséges energiát is a csiga hozza létre (hacsak nem használnak ömledékszivattyút). Nyilvánvaló, hogy a legtöbb energiát is itt lehet megtakarítani. Az extrudereket általában a megszokott, nagy fordulatszámú motorokkal hajtják meg, amelyek fordulatszámát áttételekkel csökkentik le az aktuális csiga-fordulatszámra.



2. ábra Az extrúzióban előforduló energiaáramok (Sankey-diagram)



3. ábra Egy konkrét méréseken alapuló Sankey-diagram

Extrúziós meghajtások előnyei és hátrányai

Régebben egyenáramú motorokat is használtak az extruderek meghajtására jó járathatóságuk és szabályozhatóságuk miatt. Ezekben árammal átjárt állórész és rotor található, amelyekben párhuzamosan kapcsolják be és ki az áramot, a forgatónyomatékot a *Lorentz-erők* szolgáltatják. A pólusváltást az úgynevezett kommutátor végzi. A kommutátorral érintkező szénkeféket úgy rendezik el, hogy azok forgás közben időben hozzák létre a pólusváltást. A keféket rendszerint olyan anyagból készítik, amelyek jól vezetnek az áramot, ugyanakkor nem kopnak erősen (pl. önkenő grafit, adott esetben rézporral elegyítve). A kommutátorral való érintkezéskor film alakul ki a kollektoron, ami nagy ózon- és paraffinterhelést okoz, és gyorsan amortizálja a szénkefét. A szénkefék kopó alkatrészek és 6–12 havonta cserélni kell őket. A szénkefe cseréjét felhasználják a motortér tisztítására is, de a gyakori leállások nem kedvezőek a termelés szempontjából. Az egyenáramú meghajtás hátránya az áramátalakítók nagy veszteséges áramfelvétele a kisebb és közepes fordulatszámoknál, valamint a nagy hőfejlődés, amelyet léghűtéssel kell kompenzálni. A nagy egyenáramú motorok fordulatszáma majdnem független a terheléstől. Az egyenáramú motorok jól, gyors válaszidővel túlterhelhetők. A felfutáskor mérhető nyomaték és áram a névleges értéknek kb. 1,8-szorosa.

Az egyenáramú meghajtások száma azonban folyamatosan csökken, és inkább *az energetikailag hatékony váltóáramú meghajtások terjednek el*. A nagyobb beruházási költségek (frekvenciaváltó, drágább motor) már a felhasználás első 2 évében megtérül a kisebb energiaszámlákban. A váltóáramú aszinkronmotor nem igényel szénkefét, egyszerű felépítésű, megbízható, viszonylag olcsón előállítható és hosszú élettartamú – ezért az egyik legelterjedtebb meghajtás. Jól terhelhető és jó hatásfokkal működik együtt a frekvenciaváltókkal. Az aszinkronmotorban a forgató teret a forgórész hozza létre. *Az aszinkronmotor hatásfoka kisebb ugyan a szinkronmotorénál, de nagyobb, mint az egyenáramú motoré.* A fordulatszámokban fennálló „lyukak” miatt bonyolult motormodellre kell alkotni a forgatónyomaték és a fordulatszám szabályozásához. A mai számítástechnikai lehetőségek mellett azonban ez már nem jelent problémát. Az aszinkron motorok hatékonysága erősen csökken a részleges terhelés tartományában, de ezt kompenzálni lehet egy intelligens frekvenciaátalakítóval, amely részleges terhelésnél a motormodellre egy kisebb, energiatakarékos motorra cseréli.

Az állandó mágneses váltóáramú szinkronmotorokban a rotorra neodímium-vasbór állandó mágnesek vannak felragasztva, ezért azok mágneses terét nem szükséges veszteség árán, árammal fenntartani. Ez igen jó hatékonyságot eredményez. A szinkronmotorok fordulatszáma megegyezik a váltóáram frekvenciájával, ezért nem alakulnak ki „lyukak”, mint az aszinkronmotorok esetében. A rotorban nem lépnek fel mechanikai feszültségek. *Az extrúziós meghajtás szempontjából a szinkronmotorok nagyon kedvezőek jó hatásfokuk és kis karbantartási igényük miatt.*

Az eddig említett, nagy fordulatszámú meghajtások mellett, amelyeknél a motor fordulatszámát le kell csökkenteni az aktuális csigafordulatra, léteznek úgynevezett *közvetlen meghajtások* is. Ilyenek az ún. *nagynyomatékú motorok* és a *CMG Knödler*

kompakt meghajtó rendszerek. A nagy nyomatékú motor egy sokpólusú szinkron szer-
vomotor, amelynek rotációs terét állandó mágnesekkel biztosítják. Ha a munkapontot
jól választják meg, igen jó hatásfokkal működik, amelyet a meghajtás sem csökkent.
Ha azonban csökken a fordulatszám vagy nő a nyomaték, a hatékonyság csökken. A
nagy pólusszám és a nagy momentum létrehozásához szükséges nagy légrés miatt a
nagy nyomatékú motorok átmérője nagyobb, mint a nagy fordulatszámú szinkronmoto-
roké és nagyobb a tengelytávolság is. A beszerzési ár nagyobb a motormeghajtási
megoldásoknál, de a kisebb áramfelhasználás miatt ez a későbbiekben megtérül. Meg-
felelő konstrukció esetén a hatékonyság javítható a részleges terhelési fordulatszám-
tartományban, aminek az extrúziónál nagy jelentősége van. A motor fordulatszáma
állandó, ami nagy pontosságú feldolgozást tesz lehetővé. A motor dinamikájának nincs
nagy jelentősége az extrúziós meghajtás szempontjából, de az extrúziós követőegysé-
gek (pl. a fóliatekerceselő) szempontjából annál inkább.

A CMG Knödler meghajtás ugyancsak közvetlen meghajtás és négy kisebb
aszinkronmotorból áll, amelyek nyomatéka összeadódik, mert közös fogaskereket haj-
tanak meg. Ez kompakt építésmódot tesz lehetővé, és mivel a kerületi sebesség kicsi, a
vízhűtés elég halk működésű.

Az extruder teljes élettartamára vetítve, az összes költség legalább 90%-át az el-
fogyasztott áram teszi ki. A beszerzési és a karbantartási költség még meglehetősen
drága motorok esetében is csak töredéke az összköltségnek, ezért hosszú távon biztos,
hogy *az olcsóbban működtethető energiatakarékos berendezés a jobb megoldás.*

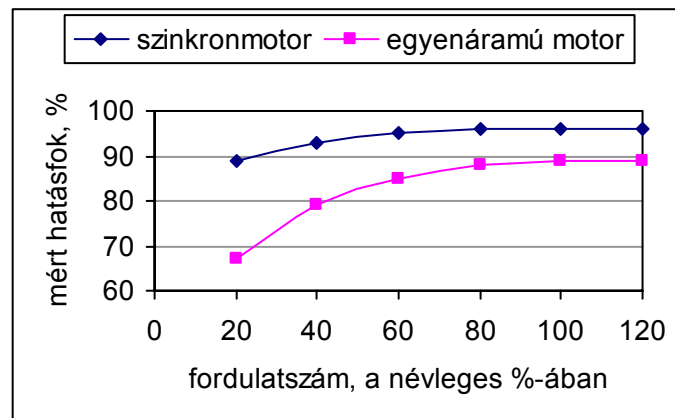
A német Szövetségi Gazdasági Minisztérium (**Bundesministerium für
Wirtschaft**) a würzburgi Dél-német Műanyag Központban (**Süddeutsches Kunststoff
Zentrum**) finanszírozott egy vizsgálatsorozatot, amelyben a fent említett meghajtások
közül többet is részletesen megvizsgáltak, mind gazdaságosság, mind a környezeti ha-
tások szempontjából. Az egyenáramú motorok jellemzője az, hogy csökkenő terhelés
és csökkenő fordulatszám mellett lényegesen csökken a hatékonyság. A motorokra
általában jellemző, hogy a névleges tartományban a nagyobb motoroknak lényegesen
nagyobb a hatékonysága, mint a kisebbeknek. Egy egyenáramú motor és egy szink-
ronmotor teljesítményének összehasonlításából az adódik (*4. ábra*), hogy a szinkron-
motor teljesítménye jobb a névleges munkapontban és sokkal kevésbé romlik a részle-
ges terhelés tartományában. Ha az extrúziós technológia megköveteli, hogy a berende-
zést gyakran részleges terhelés mellett működtessék, hatékonysági szempontból érde-
mesebb szinkronmotort használni.

Tekintettel arra, hogy csökkenő fordulatszám és nyomaték mellett a motorok ha-
tásfoka rohamosan csökken, *célszerű az extrúzió munkapontját a villamos motor név-
leges működési pontjának közelében megválasztani.* Energetikai szempontból indokol-
atlan és káros tehát az óvatosságból túlméretezett rendszer alkalmazása.

A frekvenciaátalakító közvetít a meghajtás és a feldolgozási folyamat között

A modern villamos meghajtások vezérléséhez frekvenciaátalakítókat használnak,
amelyek az 50 Hz-es tápfeszültséget az adott motorfordulatszámhoz szükséges frek-

venciájúvá átalakítják. Ezt teljesítményelektronikai eszközökkel érik el, ami azonban óhatatlanul veszteségekkel jár. A névleges tartományban a frekvenciaátalakító 96-98%-os hatásfokkal működik, nagyobb üzemi frekvencián azonban a nagyobb kapcsolási veszteség miatt a hatásfok 94–95%-ra csökken. A részleges terhelési tartományban az állandó veszteségi hányad miatt a hatásfok lényeges mértékben tovább csökken. A frekvenciaátalakító működési frekvenciája határozza meg a veszteség megoszlását a frekvenciaátalakító és a meghajtás között. Általában 4 kHz-en működik, ennél kisebb frekvencián a veszteség a frekvenciaátalakítótól a motor felé tolódik. Ha a frekvenciaátalakító paraméterei nem felelnek meg a motornak és az alkalmazásnak, további veszteségek lépnek fel. A működési frekvencia mellett a terhelési áram és a feszültségi osztály is hatással vannak a frekvenciaátalakító hatásfokára. A frekvenciaátalakítók hatásfokát többek között azzal próbálják javítani, hogy a megszokott szilícium félvezető helyett szilícium-karbidot használnak, amelynek előnyei különösen nagyobb kapcsolási frekvenciánál jelentkeznek.



4. ábra Egy szinkronmotor és egy egyenáramú motor hatásfokának összehasonlítása névleges nyomaték szerinti terhelésnél, különböző fordulatszámok mellett.

A névleges fordulatszám: 2200 min^{-1}

Mennyi legyen a fordulatszám?

A nagy fordulatszámon működő motorok és a kisebb fordulatszámon működő meghajtások között ma elsősorban 2–3 lépcsős fogaskerekes áttételek közvetítenek. Áttételenként 1–1,5% veszteség lép fel, amihez még hozzájön a tengelycsapágy 0,5%-os vesztesége. Ebből adódik a *meghajtás 95–97,5%-os hatásfoka*, amely függ a kenőanyag munkahőmérsékleten mutatott dinamikus viszkozitásától, a kiindulási kerületi sebességtől, a fogazat geometriájától és a felület minőségétől. Noha a hatásfok általában elég nagy, a meghajtás optimalizálásával további energiát lehet megtakarítani. Az optimalizálás ebben az esetben a konstrukció és a megfelelő kenőanyag megválasztását jelenti. A szíjmeghajtások kisebb hatásfokuk miatt nem jelentenek értelmes alterna-

tívát. A fogasszíjak 97–98%-os hatásfokuk miatt érdekesek lehetnek, a forgatónyomatékok megbízható átvitele miatt azonban extúziónál a fogaskerék az első jelölt.

Az egyenáramú motoroknál alkalmazott tirisztoros egyenirányítók üresjáratnál is fogyasztanak, ami a hálózatot terheli, és amelyet az energiatermelési oldalon is kompenzálni kell. Az üresjáratú veszteség miatt az átviteli veszteségek is nőnek. Az üresjáratú teljesítmény kompenzálása csökkenti a veszteséget és a költségeket. A frekvenciaátalakítók által kiszolgált váltóáramú motorok esetében ezek a problémák nem lépnek fel, a motoráram induktív komponensei már a frekvenciaátalakító köztes áramkörében nagyrészt kompenzálódnak. A fogyasztási veszteségeket nemcsak az üresjáratú áramok, hanem a csúcspontok is negatívan befolyásolják. *Ha a beindítás és a nagy energiafogyasztású időszakokat időben eltolják, kiegyenlítettebbé válhat a nap közbeni energiafelhasználás.* Ezt megfelelő vezérlőprogramokkal lehet megkönnyíteni és láthatóvá tenni.

Optimalizálás folyamatszabályozással

Amikor a feldolgozási folyamatot energetikailag optimalják, gondoskodni kell arról, hogy homogén és egyenletes minőségű ömledéket kapjanak, megfelelő nyomáson. Az energiamegtakarítás nem mehet a termékminőség rovására. A paramétereket úgy állítják be, hogy nagy fordulatszámra minél nagyobb legyen az ömledékihozatal. Ez többnyire magas hőmérsékletű ömledéket is jelent, hiszen a nagyobb fordulatszám nagyobb nyíróerőt és nagyobb mértékű melegedést jelent. A felmelegített ömledéket a henger falán keresztül hűteni is kell, hogy a szerszámban megfelelő legyen a hőmérséklet, és a rendelkezésre álló hűtési szakaszon le tudják hűteni a terméket. A kisebb csigafordulat csökkentené ugyan a hőfejlődést, de a kihozatal csökkenése miatt ez nem lenne gazdaságos. Nagyon fontos az anyaghoz és a feldolgozási módhoz igazított csigageometria, amely biztosítja a nagy fordulatszám mellett a megfelelő nyírási igénybevételt, hőmérsékletet és termelékenységet, ugyanakkor elkerüli a túlmelegedést. *Speciális csigageometriával megtakarítás érhető el a standard geometriához képest.* Az ellenforgó kétcsigás extrudereknél a belső csigatemperálással elérhető, hogy a kihordó zónában képződő többlethő átvihető legyen az olvasztó zónába. A hornyolt hengert tartalmazó extruderek (Nutbuchsenextruder) esetében a hornyolt hengert folyadékmal kell hűteni, hogy a hornyokban levő granulátumok ne olvadjon meg, mert ez elősegíti a kényszertovábbítást. Mivel az energia jó része a berendezés entalpiájának növelésére fordítódik, az átáramló hűtőfolyadék mennyiségét úgy kell megválasztani, hogy még éppen elkerülhető legyen az anyag megolvadása. A hornyolt henger geometriájának megfelelő megválasztásával elérhető, hogy jó kompromisszumot érjenek el az energiaveszteség és a szállítási teljesítmény között.

A hőveszteség csökkenthető azzal, ha szigetelik a plasztifikáló hengert és az extruderszerszámot. Ez a befektetés általában az első két évben megtérül a kisebb szerelési költségek miatt. Arra figyelni kell, hogy szigetelés után a léghűtés már nem alkalmazható a fölösleges hő elvezetésére. Jelentős energiát lehet megtakarítani azzal, ha a folyamat hőveszteségét a granulátum előmelegítésére fordítják. Ha már az

extruderbe jutás előtt növelik az anyag entalpiáját, kisebb hőmennyiségre van szükség a megömlesztéshez. Sajnos egyelőre még nincsenek piaci bevezetésre alkalmas megoldások ezen a területen.

Kisebb és energiatakarékosabb extruder

Megjelent egy extruder, amely kristályosító és szárító egység helyett egyszerűen vákuumot alkalmaz, amivel 20%-kal kevesebb energiát használ, és 40%-kal kevesebb helyet foglal el, mint a hagyományos PET feldolgozó extruderek. Felhasználhatók fóliák, filcek, granulátumok és csomagolószalagok előállításához. Ezzel a technológiával a meglehetősen szennyezett, felhasználói PET palack regranulátumok közvetlenül, különösebb előkezelés nélkül is feldolgozhatók pl. értékes csomagolószalagokká – anélkül, hogy kristályosítani, szárítani kellene őket. Elég egy egyszerű ömledékszűrés, és nincs szükség ömledékszivattyúra.

A poliészter csomagolószalagok nagyon tartósak, nyúlóképességük korlátozott, jó alternatívát jelentenek az acél pántolószalagokkal szemben. Alkalmazhatóságukat nem befolyásolják a hirtelen hőmérséklet-ingadozások vagy az UV-sugárzás. A szalagok feszültsége a csomagolás és szállítás minden fázisában állandó, ami növeli a szállítás biztonságát. A PET szalagok nem rozsdásodnak, könnyen használhatók automatikus bálázógépekkel is, és könnyűek. Az a tény, hogy gyakorlatilag hulladékból is legyárthatók, különösen gazdaságossá teszi gyártásukat és alkalmazásukat.

Az olasz **Sima** cég (Bologna) a **Gneuss Kunststofftechnik-től** vásárolt egy MRS-90 extrudert (MRS = multitrotációs rendszer), amelybe egy automatikus ömledékszűrő és egy on-line viszkoziméter van integrálva. Az extruder óránként maximum 40 kg nem szárított PET hulladék feldolgozására képes 25–35 millibar vákuum mellett. A fűvókaegység három fogaskerék-szivattyúból áll, amely hat darab, 12,5 mm széles, 0,65–0,8 mm vastag szalag extrúziójára képes. A nyújtás 1–8-szoros, a lehúzási sebesség akár 120 m/min is lehet.

Hatékonyság és technológia

A hagyományos megoldáshoz képest, ahol kristályosítással és előszáritással 50 ppm alá csökkentik a nedvességtartalmat, az újfajta extruder energiafelhasználása 20%-kal kisebb, mert az energiafalo előkezelési műveletek elmaradnak. Ha a feldolgozást kétszigás extruderrel végeznék, az energiafelhasználás jelentősen nőne, mert sokkal nagyobb (5 mbar-nál kisebb) vákuumra lenne szükség, és a PET darálékot 1000 ppm víztartalom alá kellene előzetesen szárítani, és még ömledékszivattyút is használni kellene a nyomás növelésére. Az új megoldás nemcsak 15–25%-kal kevesebb energiát igényel, hanem rugalmasabb is és kevesebb karbantartást igényel. A normál, megszokott egyszigás extrúziós technológiáról van szó, de *a kigázosító zóna különleges*. Az ömledékáramot egy nagy, forgó egyszigás dobba vezetik. A dobban a mérettől függően hat vagy nyolc, a forgástengellyel párhuzamos hengeres furat helyezkedik el, benne szállítócsigákkal. Ezeket a csigákat egy fogaskoszorú hajtja meg, aminek hatá-

sára azok az extrúziós dobbal ellentétes irányban forognak. A dobban levő hengerek külső része 30%-ban nyitott, ami igen jó kigázósítási hatásfokot biztosít – még hozzá már 30 mbar-os vákuumnál is, amit közönséges vízpumpával is el lehet érni. A normál egycsigás elrendezéshez képest az ömledékfelület 4,5-szeresére nő, a hagyományos kétszigás elrendezéshez képest 3-szorosára. A felület megújulása 25–50-szeresére nő. A PET feldolgozása során nagyon fontos a vízmolekulák eltávolítása az anyagból, mert az hidrolízishez, a molekulák megrövidüléséhez (viszkózitás-csökkenéshez) vezet, és kisebb szilárdságú terméket jelent. Az MRS-extruderben fellépő viszkózitás-csökkenés mértékét befolyásolja a vákuum szintje, ezért célszerű beépített viszkóziméterrel ellenőrizni a folyóképesség alakulását, és ezzel visszaszabályozni a vákuumot. Az MRS zóna után már ismét kialakul a nagy ömledéknyomás, emiatt kisebb a valószínűsége a hidrolitikus lebomlásnak.

Összeállította: Dr. Bánhegyi Görgy
www.polygon-consulting.ini.hu

Bastian, M., Stübs, O., Gehring, A.: Energie endlos sparen = Kunststoffe, 99. k. 10. sz. 2009. p. 160–167.

Kossmann, A.: Kleiner und sparsamer = Plastverarbeiter, 60. k. 7. sz. 2009. p. 24–25.