

A tömlőbuborék stabilitása fóliafúváskor

A fóliafúvás termelékenységének korlátait ma gyakran nem az extruder kapacitása, hanem a fóliatömlő stabilitása szabja meg, és az, hogy milyen rövid távon tudják a fóliát a dermedési pont alá hűteni. A hűtés és a stabilitás összefüggését elméleti szinten is kutatják, a fúvóberendezések gyártói pedig új technológiákat fejlesztenek ki a hűtés hatásosságának növelésére.

Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; fóliafúvás; gyártástechnológia; hűtés; tömlőstabilitás; fúvóberendezés.

Az olyan alakadó eljárásokban, ahol a műanyagömledék felülete a szabad levegővel érintkezik (szálhúzás, fóliaöntés, fóliafúvás), a gyártás sebességét korlátozhatja a gyártási folyamat instabilitása, amely végső soron elfogadhatatlan minőséget eredményezhet. *A fóliafúvás termelékenysége sem az extruder kihozatalától függ, hanem a gyűrű alakú szerszámból kiáramló tömlő felfúvása révén képződő buborék stabilitásától.* Az instabilitásnak többféle formáját figyelték meg: a húzási rezonanciát, amikor a buborék átmérője periodikusan változik; a csavarvonalú mozgást; a dermedési vonal magasságának periodikus változását; a buborék megereszkedését, amelynek következtében a fólia „ráül” a szerszámra; a fólia elszakadását a szerszám közelében; a tömlő lebegését vagy „lélegzését”. Az instabilitás oka lehet a paraméterek helytelen megválasztása, a gépi berendezések hibája vagy az alkalmatlan anyag kiválasztása.

A fóliafúvás alapanyagai a poliolefinek, elsősorban a polietilének. Legkönnyebben a hosszú elágazó láncokat tartalmazó, széles molekulatömeg-eloszlású polietilénből (ilyenek a kis sűrűségű polietilének, a PE-LD-k) lehet fóliát fűjni. A lineáris kis sűrűségű polietilénből (PE-LLD) extrudált felfűjt tömlő stabilitása sokkal kisebb, ezért a fóliák többségében ezt a két polietilént keverik egymással. Nagy sűrűségű polietilénből (PE-HD) is viszonylag könnyű fóliát gyártani, polipropilénből (PP) ezzel szemben meglehetősen nehéz. A poliolefinek tömlőstabilitásának sorrendje tehát PE-LD > PE-HD > PE-LLD > PP. *Az alacsonyabb ömledék-hőmérséklet általában kedvez a tömlőstabilitásnak.*

A tömlőbuborék stabilitásában jelentős szerepe van hűtésnek. A gyűrű alakú szerszámból kiáramló tömlő alakú ömledéket többnyire dupla ajakos gyűrű alakú levegőfúvóka veszi körül, amely levegőáramot irányít a csekély belső túlnyomással felfűjt buborék külső felületére, hogy lehűtse azt. Ez a levegőáram helyenként örvénylő mozgást végezhet, és negatív nyomást gyakorolhat a még lágy polimerre, aminek következtében a tömlő elveszítheti stabilitását. A montreáli politechnikai főiskola (**Ecole Polytechnique de Montreal, Kanada**) kutatócsoportja azt vizsgálta, hogy hogyan hat a különböző sebességű hűtőlevegő a különböző gyártási paraméterekkel előállított töm-

lőbuborékok stabilitására. Vizsgált jellemzők: take-up-ratio, TUR, – tengelyirányú nyújtási arány, azaz a fólia lehúzóhengereknél és a gyűrűszerszámnál mért sebességének aránya; blow-up-ratio, BUR, – a felfújt tömlő végső átmérőjének és a gyűrűszerszámnál mért átmérőjének aránya; fóliavastagság.)

A kiegyenlítettebb hűtés érdekében egyes fóliafúvó berendezéseken a külső levegőhűtés mellett a fóliatömlőt belülről is hűtik, ugyancsak levegővel. A németországi **Kiefel Extrusion GmbH** (Worms) ezt az elvet fejlesztette tovább úgy, hogy a tömlő belsejében vízzel hűtött elemet alkalmaz a belső levegő hőmérsékletének csökkentésére.

A következőkben a két kutatócsoport munkájáról adunk áttekintést.

A gyártási paraméterek és a hűtőlevegő sebességének hatása a tömlő stabilitására

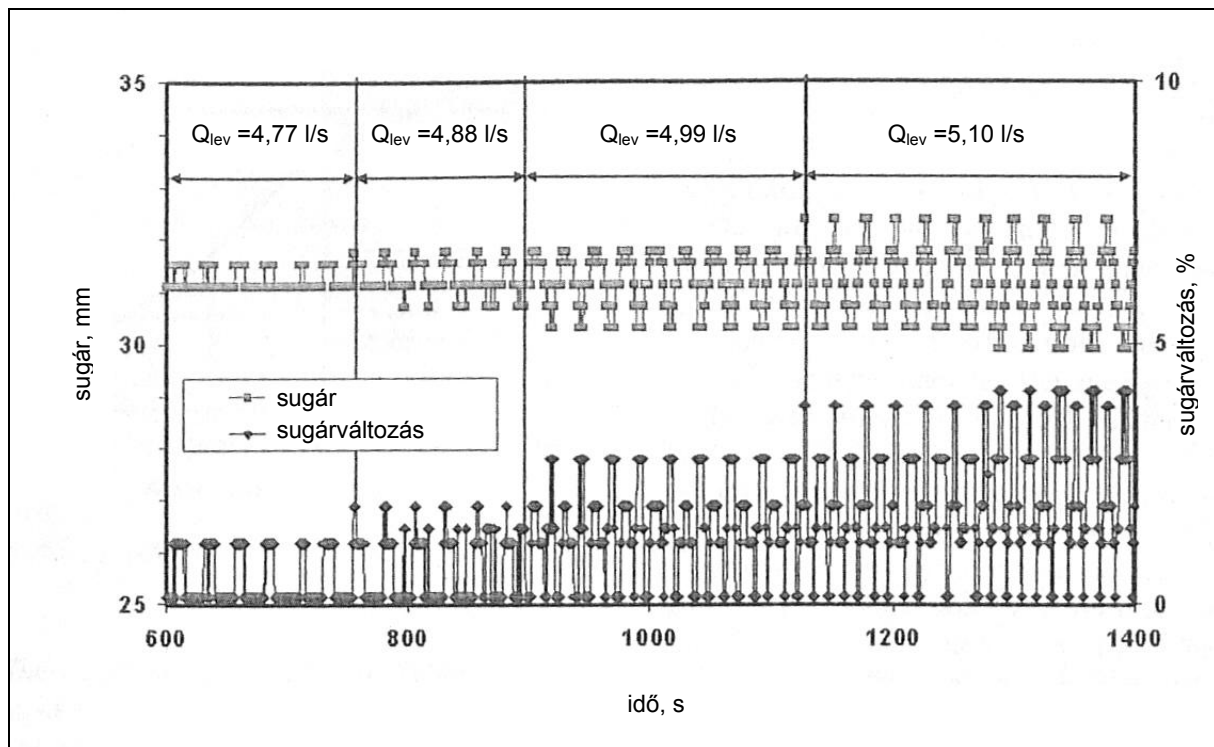
A kanadai kutatók 45 mm átmérőjű egycsigás extruderrel dolgoztak, a spirál alakú ömledécsatornát tartalmazó fúvószerszám külső átmérője 63,5 mm, a gyűrű alakú ömledékrés szélessége 3 mm volt. A 180 °C-os ömledék a résen valamennyi kísérletben $2,5 \pm 0,1$ kg/h sebességgel áramlott ki. A feldolgozott PE-LD folyási száma 1,07 g/10 min, sűrűsége $0,923 \text{ g/cm}^3$, hőkapacitása 2300 J/kg.K, olvadáspontja 112 °C volt.

A buborék instabilitását egy inline pásztázó kamera segítségével ellenőrizték, amely négyféle jelenséget jelzett ki: az excentritást, az elfordulási szöget (α), a buborék bal és jobb oldalának sugarát és a két sugár hányadosát. Az alábbiakban az instabilitás fajtái közül a húzási rezonanciát (draw resonance, DR) figyelték meg, amelynek mértéke a sugár változása:

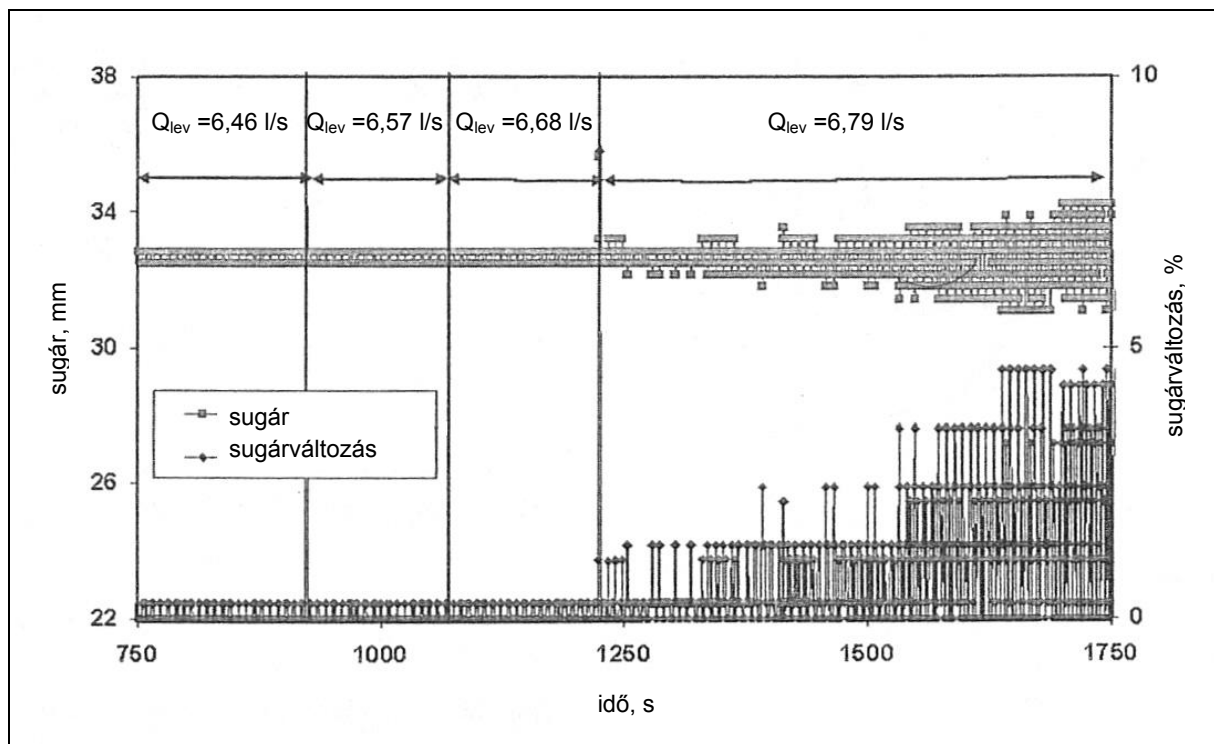
$$\Delta R = (R_f - R_s) \times 100/R_2, \text{ ahol } R_f \text{ a mért, } R_2 \text{ a kívánt sugár hossza.}$$

A kísérleteket 1, 1,75 és 2 felfúvási aránnyal (BUR) és mindegyik BUR érték mellett 20, 30, 40, 50, ill. 60 húzási sebességaránnyal (TUR) végezték. A külső hűtőlevegő térfogati áramlási sebességét fokozatosan emelték mindaddig, amíg a tömlő a stabil állapotból az instabil állapotba került.

Az 1. és 2. ábra mutatja a sugár változását és a sugárváltozás százalékos arányát BUR = 1 mellett, az előbbi esetben TUR = 20, az utóbbiban TUR = 40 hosszirányú húzási sebességarányt arányt alkalmazva. A hűtőlevegő térfogati sebességét 0,11 l/s lépésenként növelték. Ahogy a levegő sebessége TUR 20 mellett 4,77 l/s-ról fokozatosan 5,10 l/s-ra növekedett, a sugárváltozás párhuzamosan 1,2%-ról 4,1%-ra emelkedett. Az instabilitást jelző húzási rezonancia akkor jelent meg, amikor a sugárváltozás meghaladta a 2,5%-ot, azaz amikor a levegő sebessége 4,88 l/s-ról 5,10 l/s-ra nőtt. A buborék átlagos sugara azonban mindvégig hasonló volt. Amikor a TUR értékét 40-re növelték, stabil állapotban az átmérő sugarának változása 1%-on belül maradt, miközben a levegő térfogati sebessége 6,46 l/s-ról 6,68 l/s-ra nőtt. További 0,11 l/s-os növekedés hatására viszont a sugárváltozás 4,6%-ra emelkedett, és a kritikus 2,5% felett megfigyelhető volt az instabilitást jelző húzási rezonancia. A buborék átlagos átmérője csak nagyon kis mértékben volt nagyobb, mint a TUR 20-szal gyártott fóliatömlőké.



1. ábra A fóliatömlő sugarának mérete és sugárváltozásának mértéke különböző sebességű hűtőlevegő hatására BUR = 1 és TUR = 20 mellett



2. ábra A fóliatömlő sugarának mérete és sugárváltozásának mértéke különböző sebességű hűtőlevegő hatására BUR = 1 és TUR = 40 mellett

A 1. táblázat a TUR további növelésének hatását mutatja a stabilitásra és a fóliavastagságra. Látható, hogy $TUR = 20$ és $TUR = 40$ között növelhető a hűtőlevegő sebessége, a DR jellegű instabilitás veszélye nélkül; $TUR = 40$ és $TUR = 60$ között viszont fokozatosan csökkenteni kell azt az instabilitás elkerülése érdekében. Ilyen instabilitás fellépésekor változik a sugár mérete, a fóliavastagság, és síkba fektetéskor meggyűrődik a fólia. Ez a jelenség a gyártási paraméterek optimalizálásával kiküszöbölhető. $TUR = 40$ mellett a legstabilabb állapotban mindössze 0,28%-os sugáringadozást mértek, és itt volt a legnagyobb a hűtőlevegő sebessége.

1. táblázat

A tömlő huzási sebességarányának (TUR) szerepe a hűtőlevegő sebességének gyártási folyamatra és fóliavastagsára gyakorolt hatásában $BUR = 1$ felfúvási arány mellett

Jellemző	Egység	TUR				
		20	30	40	50	60
Levegősebesség DR megjelenésekor	l/s	4,99	5,34	6,79	6,56	6,12
Sugárváltozás legstabilabb állapotban	%	1,2	1	0,28	0,38	1
Levegősebesség legstabilabb állapotban	l/s	4,49	4,74	6,45	5,69	6,05
Fólia átlagos vastagsága	μm	106,5	67	44,5	38	29

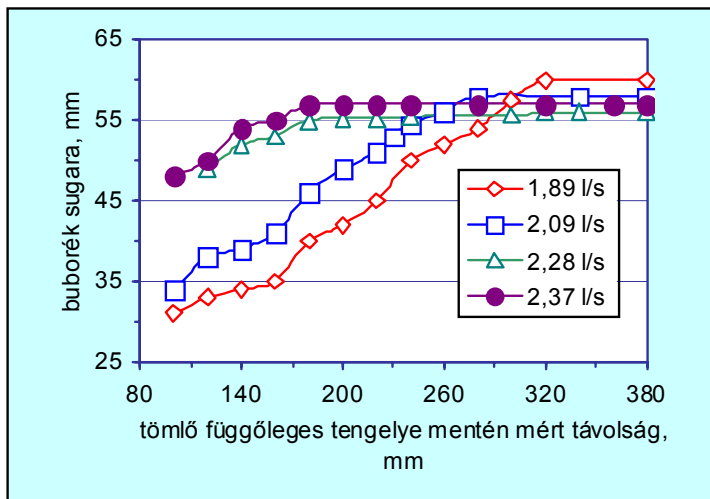
Másképpen viselkedett a buborék, ha a felfúvási arány, $BUR = 1,75$ vagy $BUR = 2$ volt. $BUR = 1,75$ és $TUR = 30$ mellett 1,89 l/s térfogati sebességű levegő kiváltotta a huzási rezonanciát, a sugáringadozás meghaladta a 2,5%-ot, a buborék hosszan elnyúló nyakat képzett. A levegősebességet növelve a nyak rövidült, a felfújt tömlő végső sugara kicsit csökkent, a sugárváltozás 2%-ra mérséklődött. 2,28 l/s levegősebesség felett a buborék stabilizálódott, a sugár ingadozása mindössze 0,4% volt (3. ábra). Hasonló jelenséget figyeltek meg $BUR = 2$ esetében is. $BUR = 1,75$ mellett $TUR = 50$, $BUR = 2$ mellett $TUR = 40$ engedte meg a legnagyobb hűtőlevegő-sebességet az instabilitás jelensége nélkül (2. táblázat).

2. táblázat

Kritikus levegősebességek az instabilitás határánál különböző BUR és TUR értékek mellett

Jellemző	Egység	BUR	TUR				
			20	30	40	50	60
Kritikus levegősebesség*	l/s	1,75	1,98	2,09	2,26	2,30	2,24
Fóliavastagság*	μm		58	38	29	21	16
Kritikus levegősebesség*	l/s	2	1,85	1,90	2,06	1,79	1,71
Fóliavastagság*	μm		54	36	25	18	15

* Az instabilitás határán.



3. ábra
A buborék alakja (a tömlő függőleges tengelye mentén mért sugara) a hűtőlevegő sebességének függvényében (BUR = 1,75, TUR = 30)

Amikor a hosszú nyakú buborék rövid nyakú formába megy át, növekszik a térfogata, emiatt csökken a buborék belsejében a nyomás. A 3. ábrán ábrázolt kísérlet-sorban az 1,89 l/s levegővel hűtött buborékban az átlagos statikus nyomás 67,5 Pa, 2,09 l/s levegővel kb. 62 Pa, 2,28 l/s levegővel kb. 59 Pa volt (és ez utóbbinál volt a legkisebb a sugár ingadozása), a levegősebesség további növelésekor (2,37 l/s-ra) viszont hirtelen 77–78 Pa-ra nőtt a nyomás, és nagyon erősen ingadozott a sugár nagysága.

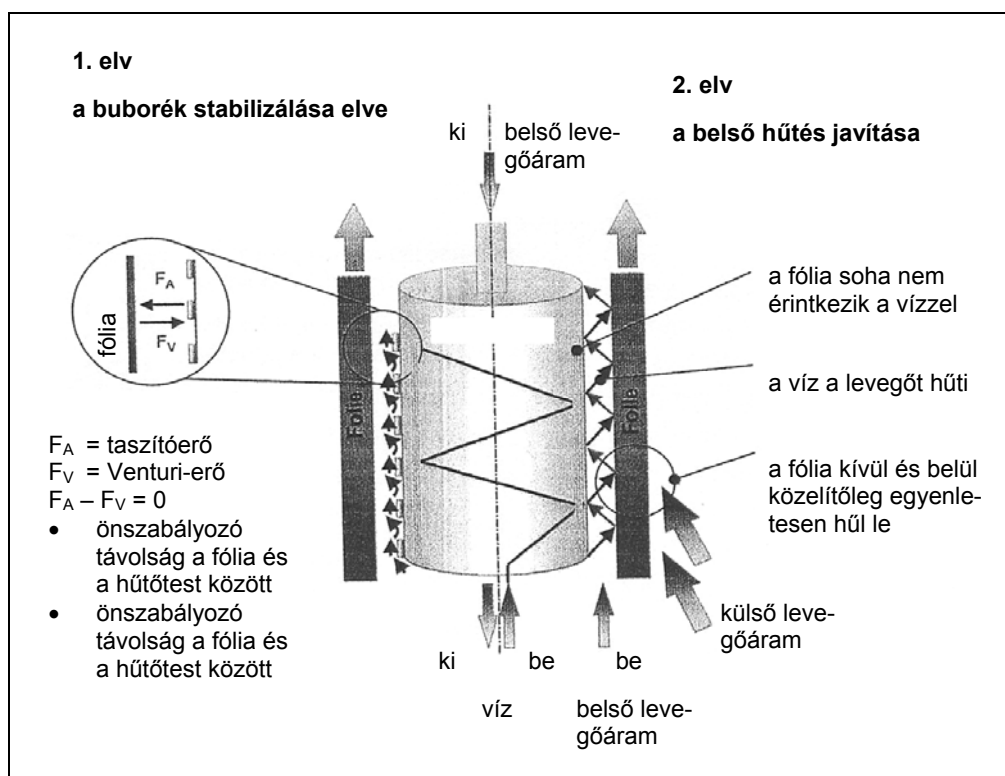
A kísérletek kétségtelenné tették, hogy a buborék instabilitása erősen függ a gyártási paraméterek – a BUR, a TUR és a hűtőlevegő térfogati sebességének – kölcsönhatásától. Az utóbbi mozgási energiát (momentum transfer) ad át a fóliának, a fólia pedig hőenergiát a levegőnek. A kutatócsoport egy korábbi munkája során numerikus szimulációval vizsgálta a buborék belső nyomását, és arra a következtetésre jutott, hogy az instabilitás a buborék belső felületén kialakuló nyomáseloszlástól függ. A buborék stabilitása növekszik, ha minimalizálják a sztatikus nyomásgradienst.

Új technológia a fóliatömlő jobb hatásfokú hűtéséhez

Az extruderből kijövő fóliatömlőt a gyűrűszerszám és a dermedési vonal között kell erőteljesen hűteni. A hőátvitel itt konvektív hőátadással megy végbe, azaz a fólia a hőenergiát a levegőnek közvetlenül adja át. A hővezetésnek nincs szerepe, a hőszugárzás hővesztesége pedig elhanyagolható. A ma használt gyűrű alakú dupla ajakos külső levegőfúvókák felső részén a kiáramló levegőáram átlagos sebessége kicsit nagyobb, mint az alsó részen, ennek következtében Venturi-hatás lép fel, a képződő buborék a hűtőgyűrű fölé hajlik, növekszik az átlagos áramlási sebesség és javul a hőátadás. A hűtőgyűrű kialakításától függetlenül azonban a tömlő külső palástja mentén felfelé áramló levegő hőmérséklete növekszik, mégpedig annál nagyobb mértékben, minél hosszabb a hűtési szakasz.

Javítható a hűtés hatásfoka kiegészítő belső hűtéssel. Az *IBC rendszert* (*inner bubble cooling, belső hűtőrendszer*) tartalmazó fűvóberendezések a buborék belsejében hűtőlevegőt cirkulálnak. Ennek hőelvezetése azonban korlátozott; a külső és a belső levegő hűtő hatásának viszonya 75:25–90:10 között változik, aminek oka a belső levegő mennyiségének korlátozott volta és hőmérsékletének gyors emelkedése.

A **Kiefel Extrusion GmbH**-nál úgy gondolták, hogy ha a gyenge hővezető képességű ($\lambda = 0,026 \text{ W/mK}$) és kis hőkapacitású ($c_p = 1,00 \text{ kJ/kgK}$) levegő helyett vizet ($\lambda = 0,604 \text{ W/mK}$, $c_p = 4,2 \text{ kJ/kgK}$) is alkalmaznak a belső hűtésben, javítani tudják a kétféle hűtés arányát. Ötletüket az *ECP* (*enhanced cooling packet*) rendszerben és a *Perfect Cool* berendezésben valósították meg. Az első változatot nehézsákok fóliáinak gyártásához használták, ahol az extruderek fűvókájának átmérője 200 mm-nél kisebb. A rendszer ma már 200 mm-nél nagyobb extruderszámmokhoz is rendelkezésre áll.



4. ábra A fóliabuborék stabilizálására és a hűtés hatásfokának növelésére alkalmazott belső hűtőtest működésének elve

Mindkét hűtőrendszer lényege a fólia belsejébe helyezett hűtőtest, amelynek felületét zárt belső csőrendszerben áramló víz tartja hidegen. A hűtőtest geometriáját és felületét úgy alakították ki, hogy a fólia és a test közötti vonzó és taszító erők kiegyenlítsék egymást, azaz a felfújott fólia nagy sebesség mellett is stabil maradjon. A felület geometriája révén a hűtőtest és a fóliatömlő között a levegő áramlása turbulens, ami javítja a hőátadást. A belső hűtőlevegő így a dermedési vonal eléréséig kevéssé meleg-

szik fel, és ezért sokkal jobb a hatásfoka. A hűtővíz soha nem kerülhet érintkezésbe a fóliával. A fólia stabilizálásának és a hűtés hatásfokának elve a 4. ábrán látható.

A külső levegőáram dupla ajkos hűtőgyűrűn keresztül áramlik a fólia felületére és úgy alakították ki, hogy áramlása lamináris legyen. A levegőáramot összehangolták a turbulens belső levegőárammal.

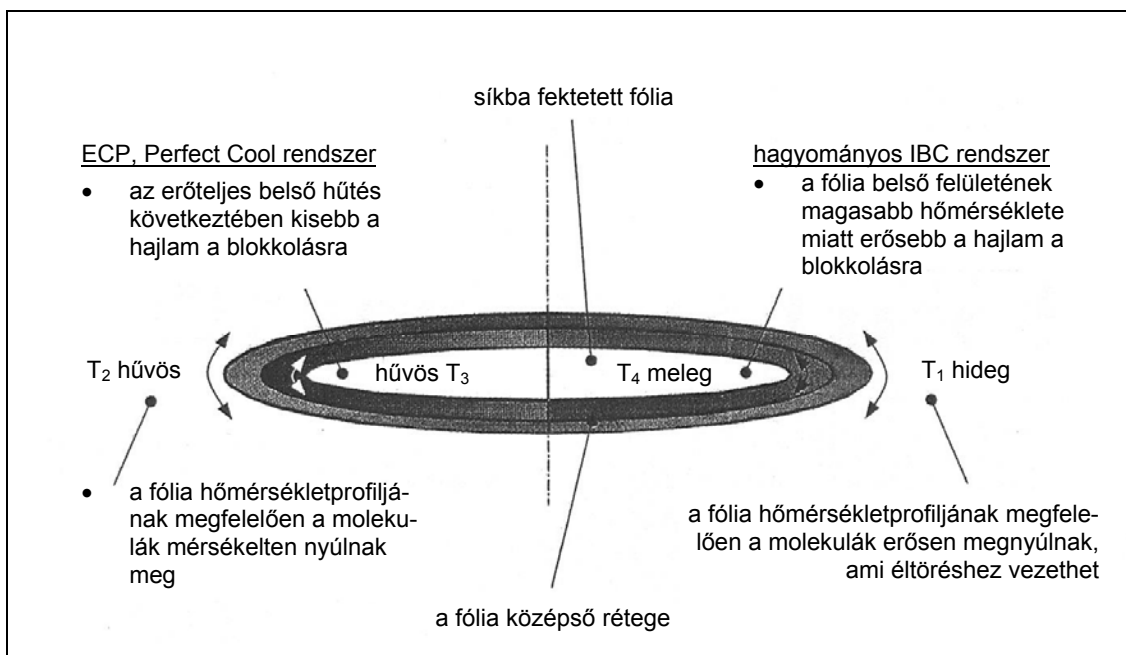
A hagyományos IBC rendszer és az ECP, ill. Perfect Cool rendszer közötti összehasonlításakor megfigyelhető, hogy az

ECP és Perfect Cool rendszerben

- a hűtőtest teljes hosszában hűvös marad a hűtőlevegő, ezért a fólia végig jó hatásfokkal és egyenletesen hűl le,
- nagyobb a levegőáram, ezért jobb a hőátadás.

IBC rendszerben

- a tömlő magasságának növekedésekor egyre melegebbé válik a levegő, emiatt lassabban és egyenetlenül hűl a fólia,
- kisebb levegőáram alkalmazható, emiatt rosszabb a hőátadás.



5. ábra Az új hűtőrendszerrel elérhető egyenletes hűtés eredményei a fólia tulajdonságaiban a hagyományos hűtéssel szemben

A Kiefel cég új hűtőrendszere a külső és belső hűtés hatásfokának viszonyában megközelítheti vagy elérheti az 50:50 %-ot. Az egyenletes hűtés a fólia jobb tulajdonságaiban is megmutatkozik. Csökken pl. a szélek töredezésére való hajlam, kevésbé kell tartani a blokkolástól, ami lehetővé teszi a gyártás sebességének növelését. A rendszer előnyeit a hagyományos hűtéshez viszonyítva az 5. ábra érzékelteti.

A Kiefel cég az új hűtőrendszer sikere után végigvizsgálta a fóliafűvés teljes folyamatát, és módosításokat hajtott végre az extruder csigáján is. Ennek eredménye-

képpen csökkenteni tudta az ömledék hőmérsékletét és növelni tudta fúvóberendezéseinek teljesítményét.

Összeállította: Pál Károlyné

Zhang, Z.; Lafleur, P. G.: Investigation of LDPE blown film instability induced by air cooling. = Polymer Engineering and Science, 48. k. 8. sz. 2008. p. 1504–1510.

Lettowsky, Ch.: Wasser mit Luft kombiniert. = Kunststoffe, 98. k. 11. sz. 2008. p. 82, 84–85.