



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

TÖRÖK DÁNIEL

TDK MUNKA

STATIKUS KEVERŐK HATÁSFOKÁNAK ELEMZÉSE

Témavezető:

Dr. Kovács József Gábor

egyetemi docens

Konzulens:

Suplicz András; Szabó Ferenc

tanársegédek

BUDAPEST, 2014

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ez a TDK munka a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a TDK dolgozatra előírt tartalmi és formai követelménynek megfelelően készült. E TDK munkát a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2014. október 22.

Dr. Kovács József Gábor

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Török Dániel* (RKMRXX), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és *dolgozatomban* csak a megadott *forrásokat* használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2014. október 22.

Török Dániel

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani a témavezetőmnek Dr. Kovács József Gábornak és konzulenseimnek Szabó Ferencnek és Suplicz Andrásnak, akik szakmailag sokban hozzájárultak ennek a dolgozatnak az elkészüléséhez.

TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás	iii
Jelölések jegyzéke	v
1. Bevezetés	2
2. Szakirodalmi áttekintés.....	4
2.1. Színezékek és adalékok típusai	4
2.2. Keveredés megvalósításának eszközei.....	11
2.3. Fröccsöntésszimuláció	21
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések	26
3.1. Alkalmazott berendezések.....	26
3.2. Felhasznált anyagok	26
3.3. Mérési módszerek	27
4. Statikus keverők minősítése.....	30
4.1. Statikus keverőn fellépő nyomáscsökkenés vizsgálata.....	30
4.2. Statikus keverő homogenizáló képességének minősítése	34
5. ÖSSZEFOGLALÁS/EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE.....	37
5.1. Eredmények.....	37
5.2. Távlati célok.....	37
6. Felhasznált források	39

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

A jegyzék a dolgozatban előforduló jelölések magyar és angol nyelvű elnevezését, valamint fizikai mennyiségek esetén azok mértékegységét tartalmazza. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik a hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
t	idő (time)	s
v	sebesség (velocity)	m/s
g	nehézségi gyorsulás (gravitational constant)	m/s ²
c _p	fajhő (specific heat)	J/K
T	hőmérséklet (temperature)	K
k	ablakméret (window size)	pixel
MD	átlagos eltérés (mean difference)	-
HMD	legnagyobb átlagos eltérés (highest mean difference)	-
GMD	teljes képet jellemző átlagos eltérés (global mean difference)	-
CMD	korrigált hibaérték (corrected mean difference)	-
dp	nyomáskülönbség (pressure difference)	bar
d	átmérő (diameter)	mm

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
ρ	sűrűség (density)	kg/m ³
σ	feszültség (stress)	MPa
η	dinamikai viszkozitás (dynamic viscosity)	Pas
γ	nyírás (shear)	rad
λ	hővezetési tényező (thermal conductivity)	W/mK

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
ABS	akrilnitril butadién sztírol (acrylonitrile butadiene styrene)
PC	polikarbonát (polycarbonate)
UV	ultraviola (ultra violet)
CTM	- (Cavity Transfer Mixer)
CAD	Számítógéppel segített tervezés (Computer Aided Designing)
CAE	Számítógéppel segített mérnöki munka (Computer Aided Engineering)
CAM	Számítógéppel segített gyártás (Computer Aided Manufacturing)
LED	világító dióda (Light Emitting Diode)
dpi	pont per hüvelyk (dot per inch)

Lab	színtől független fényesség (luminance) zöld és vörös közti átmenet (green-red transition)
RGB	sárga és kék közti átmenet (yellow-blue transition), színkoordináták
PP	vörös (red) zöld (green) kék (blue), színkoordináták
GF	polipropilén (polypropylene)
	üvegszál (glass fibre)

1. BEVEZETÉS

A fröccsöntés a műanyagipar egyik legmeghatározóbb tömegtermelésre alkalmas gyártástechnológiája. Fröccsöntéssel bonyolult 3D-s termékeket tudunk előállítani. Az alig több mint 100 éve létező eljárás az utóbbi években egyre nagyobb mértékű szerepet játszik a polimer termékek gyártásában. A világon feldolgozott műanyagok körülbelül negyedét fröccsöntéssel állítják elő és Magyarországon is a termékek körülbelül 30%-a így készül. Az így készült termékeket különböző területeken alkalmazzák, mint például az autóipar, csomagolóipar, orvostechika, játékipar. Sok esetben a legyártott termékeknek magas minőségi előírásoknak kell megfelelnie nem csupán műszaki, de esztétikai, funkcionális, ergonómiai szempontból is [1-3].

Az esztétikai hibák közül a termék színében lévő inhomogenitások a legszembeötlőbbek. A színbeli inhomogenitások megjelenésének fő oka a színezőanyagok nem megfelelő eloszlata a polimer mátrixban. A színezőanyagok lehetnek pigmenteket és elegyedő színezékek, amelyek megváltoztatják az alapanyag optikai tulajdonságait. Ezek nagy előnye, hogy csökkentik a termék gyártásának költségeit, mivel így nincs szükség utómunkálatokra (festés, matricázás, stb.). A színezőanyagok megfelelő eloszlata a különböző eszközök és módszerek állnak rendelkezésünkre. A termék homogenitására hatással van maga a fröccsöntő gép, a technológiai paraméterek megválasztása, keverőelemek, a csiga kialakítása, a szerszám geometriája és az alap- és színezőanyag tulajdonságai is [1, 2].

Az iparban a keverőelemek alkalmazása elterjedt. A keverőelemek két nagy típusba sorolhatók, a dinamikus és a statikus keverők csoportjába. Mindkét típusnak megvannak a maga előnyei és hátrányai. A statikus keverők előnye, hogy az aggregátba a csiga elé beépítve nem csökkentik annak hasznos hosszát, így nem rontva a plasztikálási teljesítményt. A dinamikus keverők nagy előnye, hogy jóval nagyobb nyírásnak teszik ki az alapanyagot. A nyírás a keveredés alap feltétele. A keverők hátránya azonban, hogy az ömledék szerszámba juttatásához szükséges nyomásigényt növelik. Ez a nyomásesés függ a keverő kialakításától, annak méretétől, az alkalmazott keverőelemek számától, a keverőelemek geometriájától, az ömledék folyóképességétől stb. [1, 2].

Dolgozatomban célul tűztam ki a statikus keverők minősítését. Ezen belül vizsgáltam a statikus keverőelemek számának növelésével és a keverő geometriájának megváltoztatásával együtt járó nyomásszükséglet növekedését. A nyomásszükséglet

változását a fröccsöntőgépbe szerelt szenzorok segítségével közvetetten mértem, illetve szimulációs programok segítségével határoztam meg. A mérések segítségével hitelesítettem a szimulációs eredményeket, majd a számításokat kiterjesztettem más geometriájú statikus keverőkre is. A keveredés minősítésére a tanszéken kifejlesztett színegyenetlenség mérő programot, valamint szimulációs programokat használtam.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben a TDK dolgozat megértését segítő elméleti alapok kerülnek áttekintésre. Szó lesz a polimerekhez kevert adalék- és színezőanyagok típusairól, azok eloszlásának módszereiről és eszközeiről.

2.1. Színezékek és adalékok típusai

A műanyag termékek egytől egyig tartalmaznak adalékanyagokat. Az adalékanyagok a polimerek előnyös tulajdonságait javítják, míg a hátrányosakat minimalizálják. A leggyakrabban használt adalékok a stabilizátorok, a feldolgozást segítő adalékok és színezőanyagok. A polimereket nem lehet stabilizátorok nélkül feldolgozni és a feldolgozás során szinte minden esetben színezzük az alapanyagot. Ezen kívül elterjedt az égésgátlók, a töltő- és erősítőanyagok, antisztatizáló adalékok, göcképzők, csúsztatószerkezetek használata. A stabilizátorokat és egyéb adalékokat általában a gyártó cégek már hozzáadják az általuk forgalmazott alapanyagokhoz, amíg a színezékeket sok esetben a feldolgozás során keverjük az alapanyaghoz.

2.1.1. Polimerek színezésének módjai

A műanyagok színezésének általában esztétikai okai vannak, de lehetnek műszakiak is. Például egy fekete felület jóval több energiát nyel el, mint egy fehér. Ez hasznos lehet például napelemes rendszereknél. A termékek színének meghatározása nem egyszerű feladat. A színeket egzakt módon definiálni szinte lehetetlen, mivel minden ember színérzékelése különböző. Az, hogy egy színt milyennek látunk, három dologtól függ, a megvilágítás által kibocsátott fénytől, a termék anyagának optikai tulajdonságaitól és az érzékelő karakterisztikájától. A látható fény, olyan elektromágnes sugárzás, amelynek hullámhossza 380 és 750 nm közé esik. A napból érkező fehér fény nagyjából azonos mértékben tartalmazza az egyes összetevőket ebben a tartományban. Ez a teljes elektromágneses spektrumnak - ami a röntgensugárzások nanométeres hullámhosszától a méteres hullámhosszú rádióhullámokig terjed - csak egy keskeny része [2, 3].

A tárgyak színét leginkább az általuk visszavert fény spektrális eloszlása határozza meg. A polimerek színezésére használt adalékok képesek a beérkező fénysugár adott

hullámhosszú összetevőit elnyelni, vagy visszaverni. Ezt a visszavert fénysugarat érzékeljük a szemünkkel. Az emberi szemben csapok és pálcikák találhatók. Három csoportja különböztethető meg a csapoknak aszerint, hogy az elektromágneses sugárzás mely hullámhosszú összetevőire érzékenyek. A pálcikák a világosságbeli különbségekre érzékenyek [2, 3].

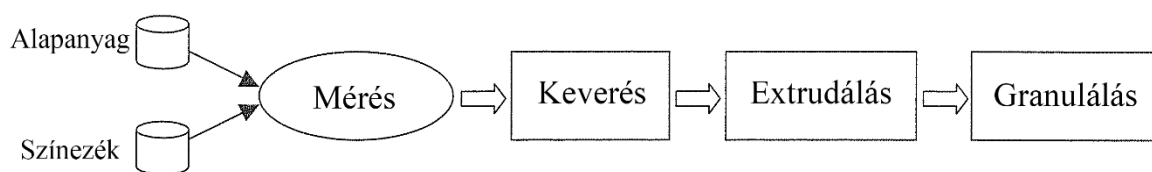
A polimerek színezésére a színezőanyagok két típusát használják, a folyékony és a szilárd színezékeket. Mindkét típusnak megvannak az előnyei és hátrányai. A szilárd színezőanyagok csoportján belül megkülönböztethetjük a por alapú és a mesterkeverékes színezőanyagokat. A termoplasztikus polimereket általában mesterkeverékekkel színezik, míg a térhálós polimerek esetében leggyakrabban a folyadékos színezékeket használják, mert ennek eloszlata viszonylag egyszerű. A térhálós polimerek anyagában való színezése még a térhálósítás előtt lehetséges, utána már csak festéssel, illetve matricázással oldható meg. Az elasztomerek színezése hasonló a térhálós polimerekéhez [3].

Mesterkeverékek

Napjainkban a mesterkeverékes színezés a legelterjedtebb formája a polimerek színezésére használt adalékoknak. A mesterkeverékek olyan granulátum formájú polimer blendek, amik nagy koncentrációban tartalmazznak színezéket és adalékokat. A mesterkeveréket a fröccsöntési folyamat közben adjuk az alapanyaghoz. Az adagolás könnyen és pontosan szabályozható. A mesterkeverékeket elegendő néhány tömegszázalékban hozzákeverni a színezendő alapanyaghoz. Az adagolás történhet gravimetrikus illetve volumetrikus adagolótolcsérek segítségével. Ha csak kis mennyiségről van szó, bekeverhetjük kézzel is az alapanyagot, azonban az iparban ez nem járható út. A mesterkeverékben található színezőanyag mennyisége függ a színtől, amit el szeretnénk érni. Az intenzív, sötét színek körülbelül 50% színezéket, 10% adalékot és 40% hordozóanyagot tartalmazznak. A hordozóanyag azonos a feldolgozni kívánt alapanyaggal, tehát ABS színezésére olyan mesterkeveréket alkalmazhatunk, amelyben a hordozóanyag szintén ABS. Világos színek esetén kisebb mennyiségű színezék is elegendő [3].

A mesterkeverékek gyártása a színezék, adalékok és a hordozóanyag mennyiségének kimérésével kezdődik. Ilyenkor még mindhárom komponens por formában van. Ezután az alkotókat keverő berendezések segítségével homogenizálják, majd azt követően

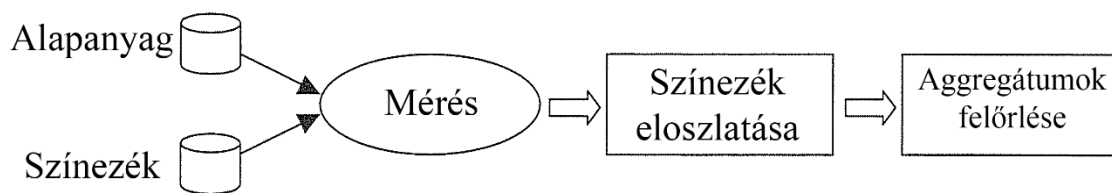
extrudálják. Az extrúzió közben a keverék nyírásnak van kitéve, így a keveredés még tovább növeli a homogenitást. Léteznek speciális, keverésre kifejlesztett csigák is. A mesterkeverékek gyártásánál általában ikercsigás extrudert alkalmaznak. Ha a színezék érzékeny a nyírásra, akkor a csigák egy irányba, egyébként egymással ellentétesen forognak. A szerves pigmentek eloszlátása például nehezebb, így nagyobb nyírást kell az anyagba vinnünk a jó keveredés érdekében. Az extrudálást követő lépés a granulálás, amelyet forgó kések végeznek, amint a polimer ömledék elhagyja az extrudert és megszilárdul. A mesterkeverékes színezés előnyei, hogy a gyártás közbeni színcsere egyszerű a többi színezési eljáráshoz képest, az adagolás jól kézben tartható, nagy mennyiségek is könnyen felhasználhatók, csak a silókból való elszállítást meg kell oldani. Hátránya, hogy a színezési eljárások közül ez a legdrágább, mivel gyártása jelentős költségekkel jár, ezen felül a mesterkeverékek felhasználása nem univerzális, tehát adott alapanyaghoz kell a mesterkeveréket megválasztani [3].



1. ábra A mesterkeverékek gyártásának lépései [3]

Folyékony színezőanyagok

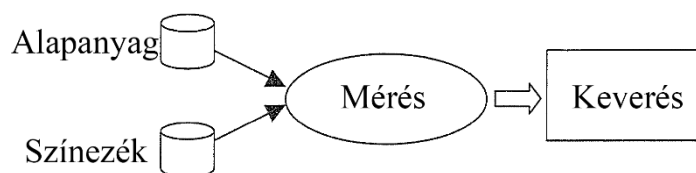
A folyékony színezőanyagok hasonlóak a mesterkeverékekhez, annyi különbséggel, hogy a hordozóanyag itt folyékony kötőanyag, például észterek, paraffin olaj, stb. A folyékony színezőanyagok is tartalmaznak adalékokat. Ha a színezéket térhálós gyanták színezésére használjuk, akkor a hordozó a térhálósítót is tartalmazza. A folyékony színezőanyagok gyártása igen egyszerű. A komponensek kimérése után az alkotókat összekeverik, majd összezúzzák az agglomerátumokat. A folyékony színezékek alkalmazásának előnyei, hogy könnyen eloszthatók a színezni kívánt alapanyagban és az adagolás pontos. Hátránya, hogy nem érhető el olyan magas színezőanyag tartalom, mint a poros vagy mesterkeverékes színezésnél és a gyártás közbeni színváltás költségei magasak [3].



2. ábra A folyékony színezőanyagok gyártásának lépései [3]

Por formájú színezőanyagok

A termékek színezésének legegyszerűbb módja - por formájú színezőanyag alkalmazása esetén - ha tiszta színezőanyagot keverünk a polimerhez. A por formájú színezékek eloszlata adalékokat igényel, amelyek segítik a megfelelő eloszlást. Az adalékok és a színezőanyag eloszlására több fajta keverő létezik, viszont tekintettel kell lenni arra, hogy a keverés során a színezékek részecskéinek mérete ne változzon meg, de emellett elegendő nyírást kell biztosítani, hogy az agglomerátumokat felőröljük. Fröccsöntésnél ritkán használják a színezésnek ezt a formáját, inkább extrúzióval használatos. Fröccsöntésnél a csigával nem tudunk elegendő nyírást bevinni a rendszerbe, így a por formájú színezéket nem tudjuk megfelelően eloszlítani. A por alapú színezés előnye, hogy magas koncentrációban adagolható a színezőanyag a polimerhez és gazdaságos, mivel az előállítási költsége igen alacsony. Legnagyobb hátránya, hogy eloszlata a polimer mátrixban igen körülményes, adalékanyagok használata elengedhetetlen és a gyártás közben történő színváltás is bonyolult [3].

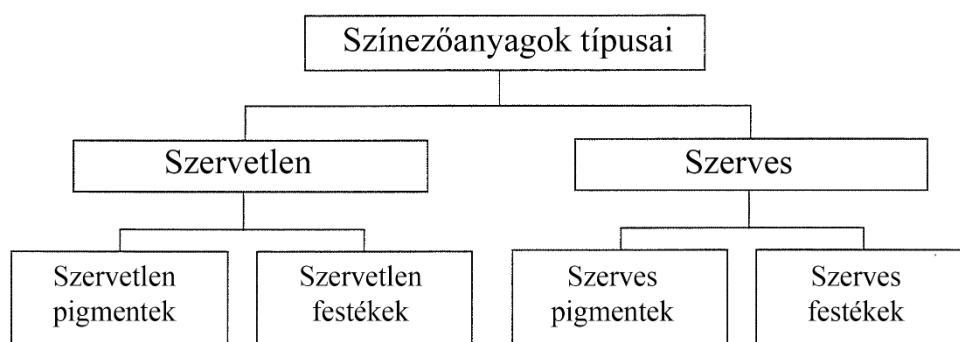


3. ábra A por formájú színezőanyagok gyártásának lépései [3]

2.1.2. Színezékek típusai

A színezékeknek hívjuk az olyan vegyületeket, amelyek képesek megváltoztatni a polimerek optikai tulajdonságait. Kémiaiilag két típusba sorolhatjuk őket, a szerves és a szervetlen színezékek csoportjába. Mindkét csoporton belül léteznek olyan színezékek, amelyek elegyednek a polimerrel, illetve olyanok, amelyek nem. A nem elegyedő színezékeket pigmenteknek hívjuk, illetve az oldódásra képeseket pedig festékeknek. Polimerek színezésére mindegyik típus használható, a szervetlen festékeket kivéve, mivel

nincs olyan polimerek színezésére használt festék, ami szerves. A színezőanyagok besorolása ezekbe a kategóriákba azonban nem mindig egyértelmű. Léteznek olyan színezőanyagok, amik bizonyos körülmények között pigmentekként viselkednek, egyébként pedig festékként. Egy ilyen színezőanyagra példa a RED 254 típusú pigment, ami nem képes oldódni a legtöbb polimerben. Ebben az esetben a termékeknek csillogó piros színt kölcsönöz. Ha viszont PC-t színezésére használjuk, akkor 330°C felett oldódásra képes az alapanyagban, tehát festékként viselkedik. A termékeknek így fluoreszkáló sárga színt ad. A színezékeknél fontos kritérium, hogy jó színező erővel rendelkezzenek, könnyen eloszthatóak legyenek az alapanyagban, aminek a színezésére használjuk, valamint ellenállóak legyenek a hővel szemben. Ha olyan termék színezésére használjuk, ami emberekkel érintkezik, akkor fontos, hogy semmilyen toxikus anyagot ne tartalmazzon a színezék, illetve az alapanyag se.



4. ábra A színezőanyagok típusai[3]

2.1.3. Adalékanyagok

Minden polimer tartalmaz valamilyen adalékanyagot, hiszen e nélkül az előállításuk sem lehetséges. Az adalékanyagok szerepe az előnyös, számunkra kedvező tulajdonságok javítása és a hátrányos tulajdonságok megszüntetése, mérséklése. Az adalékok felhasználása nem korlátozódik kizárólag a polimerek előállítására, számos más helyen is alkalmazzák őket, mint például a kozmetikai termékek előállítása, felületkezelés és festés, gyógyszeripar. A legnagyobb felhasználó azonban a műanyagipar [4].

1. táblázat Termoplasztok leggyakoribb adalékai [4]

Adalékok	Adalék feladata
----------	-----------------

Erősítőanyagok	A mechanikai tulajdonságok javítása
Töltőanyagok	Termék árának csökkentése, mechanikai tulajdonságok módosítása (ütésállóság)
Színezékek	színezés
UV stabilizátorok	UV fény hatására történő degradáció mértékének csökkentése
Égésállóak	Égési tulajdonságok módosítása
Stabilizátorok, csúsztatók,	Feldolgozási tulajdonságok javítása
Antisztatizálók	Az elektromos feltöltődés megakadályozása
Gócképzők	kristályosodás elősegítése

Ezek közül a diplomamunka témájához a színezékek erősen kapcsolódnak, ezek a 2.1.2 fejezetben már bemutatásra kerültek. A többi adalékanyag eloszlása ugyanakkora jelentőséggel bír, viszont ezek homogenitását a TDK munka keretei közt nem vizsgálom.

Erősítő- és töltőanyagok

A töltőanyagok és erősítők javítják a polimerek mérettartását és mechanikai tulajdonságait, mint például a merevséget, szívósságot és a terhelhetőséget. A töltőanyagok alkalmazása gyakran költségcsökkentés céljából történik. A leggyakoribb töltőanyagok szervesetlen ásványi porok, amelyek közül a legelterjedtebbek a kalcium-karbonát, szilikátok és az agyag. Az erősítőanyagok általában szálformában kerülnek a polimer szerkezetekbe, ezeket kompozitoknak hívjuk. A szálforma mellett a nanoerősítőanyagok is egyre nagyobb szerepet kapnak. A nanotöltőanyagok egy mérete legalább a nano tartományba esik. Eloszlatásuk nehézkes, hajlamosak az agglomerálódásra. Az szervesetlen erősítők és a szerves polimerek szerkezete nagyon eltérőek. A köztük lévő kapcsolat javítása érdekében a polimerekhez csatolószert (felületkezelő szereket) adalékolnak annak érdekében, hogy a mátrix és az erősítőanyag közti adhéziót javítsák [4, 5].

Stabilizátorok

A stabilizátorokat több csoportba sorolhatjuk aszerint, hogy milyen tulajdonságot szeretnénk velük javítani. A polimerek önmagukban nem elég stabil szerkezetűek ahhoz, hogy gyártsuk és használjuk őket, ezért kis mértékben minden műanyag tartalmaz stabilizátorokat (0,1-10%). Antioxidánsok hozzáadásával a műanyaghoz, hőállóságot növelhetünk, ami annyit tesz, hogy csökkentjük a hő hatására bekövetkező degradáció

mértékét. A hőstabilitás növelése különösen fontos az újrahasznosított polimerek feldolgozásánál. Az antioxidánsok mellett, a hővel szembeni ellenállás (hőalaktartósság) javítható fémek sóinak hozzáadásával (bárium, kadmium, cink), emellett léteznek szerves adalékok is [4].

A láncok tördelődését nem csak a magas hőmérséklet idézheti elő. A polimerek rendkívül érzékenyek az UV sugárzásra. Kültéri használat esetén kifejezetten fontos a műanyagunk fénnel szembeni ellenállásának a javítása. Ezek az adalékok érzékenyek az UV sugárzásra, a fény elektromágneses energiáját kevésbé veszélyes hőenergiává alakítják. A leghatékonyabb UV sugárzás ellen védő adalék a szén, de más pigmentek is használhatók erre a célra. Fém ionok segítségével is védhető a polimer szerkezete. A fém ionok gyorsan elvezetik az energiát, mielőtt a polimer láncok tördelődni kezdenének [4].

Égésgátlás

Az égésgátló adalékok nehezítik a polimerek gyulladását és kontrollálják a már meggyulladt alapanyag égését, csökkentik az égés közben keletkező füst mennyiségét. Ezt úgy érik el, hogy az égéshő hatására olyan anyag keletkezik belőlük, amelyek nem táplálják az égést (víz, gőz, egyéb gázok). Az égésgátlók egy másik csoportja más elven működik, ezek a polimer felületén egy nem éghető réteget hoznak létre égéskor, elszéneseznek és így a maradék éghető részt elzárják az oxigéntől [4].

Feldolgozást segítő és tulajdonságmódosító adalékok

A polimerek feldolgozása során jelentős összegeket takaríthatunk meg azzal, ha sikerül lecsökkentenünk a gyártás energia- és időigényét. Az alapanyag költségei az adalékolással nőni fognak, viszont technológiai oldalról ez megtérül. Fröccsöntésnél a ciklusidő határozza meg a költségeket. A feldolgozást segítő adalékok hozzáadásával javíthatjuk például a polimer hővezető képességét, ami a megömlesztési folyamatot rövidíti le, vagy kristályosodást elősegítő adalékok a szilárdítási fázisban fejtik ki jótékony hatásukat. A nedvesítő vagy csúsztatószerke az ömledék viszkozitását módosítják, valamint csökkentik az adhéziót a gép alkatrészei és a polimer ömledék közt [4, 5].

Antisztatizáló és vezetési tulajdonságokat módosító adalékok

Manapság a műanyagok felhasználása az elektronikai iparban nagyon elterjedt. Rengeteg konnector, háztartási termék és a vezetékek bevonata készül műanyagból. Fontos szempont, hogy ezek használata biztonságos legyen. A számítástechnikai alkalmazásokban el kell kerülni a véletlen feltöltődést, szikrakisüléseket. Sokféle adalék áll a rendelkezésre, melyekkel a polimer vezetőképessége beállítható (pl.: szénszál, fémek, fémszálak). Az antisztatizálók pedig megakadályozzák a feltöltődést. Az antisztatizálókat vagy a feldolgozás előtt vagy közben keverik a polimerekhez. A vezetési tulajdonságokat módosító adalékok általában mesterkeverék vagy szál formájában kaphatók. Adalékok segítségével az elektromágneses interferencia ellen is lehet védekezni, ami különösen előnyös például a híradástechnikai eszközöknél. Ezek általában olyan mesterkeverékek, amelyek acélt tartalmaznak rövidszál formában [4].

2.2. Keveredés megvalósításának eszközei

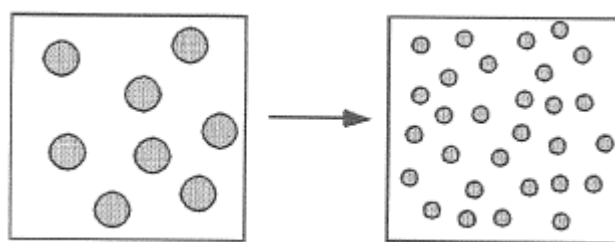
A fröccsöntési technológia fejlődésével egyre nagyobb minőségi követelményeknek kell megfelelni, ami kihívást jelent. Töltött és színezett rendszerek esetén különös figyelmet kell fordítani az alapanyagok megválasztására, a technológia helyes beállítására és az ömledék homogenitásának biztosítására, ami keverőelemek alkalmazásával javítható. Minderre azért van szükség, hogy a gyártott termékek reprodukálhatók és jó minőségűek legyenek. Fröccsöntéskor általában dinamikus és statikus keverőelemek egyaránt használhatók. A dinamikus keverők a csigára szerelhetők fel, a statikus keverők pedig a csiga elé. A statikus keverőelemeket egy fűvókába foglalják, ami egyszerűen a fröccsgép aggregátjára utólag is felszerelhető. Az ömledék homogenizálásának egy nem annyira elterjedt módja a speciális keverőcsiga felszerelése a gépre a hagyományos háromzónás csiga helyett. A speciális keverőcsigák hátránya, hogy az előállításuk meglehetősen drága a bonyolult geometriájuk miatt. L/D viszonyuk is nagyobb a hagyományos fröccsöntő csigához képest, mivel a három zónának (behúzó, kompressziós, homogenizáló) itt is meg kell lennie [6].

2.2.1. *Polimerek keveredésének mechanizmusa*

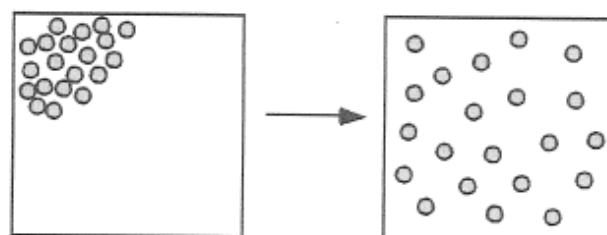
A keverés a polimerek feldolgozásának egyik legfontosabb lépése, mivel az adalék- és színezőanyagokat el kell oszlatni a műanyagban, hogy elérjük a kívánt tulajdonságot, hatást. A keverés két vagy több alkotó kombinálása oly módon, hogy a rendszer homogenitása javul a keveredési folyamat közben. A polimerek feldolgozásánál számos

keveredési folyamat játszódik le. Például, ha az alap- és színezőanyag granulátum formában van, akkor a keveredés a szilárd részecskék közt megy végbe, de ebbe a típusba sorolható az extrudálás során a granulátumok és a hozzájuk kevert erősítőanyag vagy egyéb adalékok keveredése. Az előre bekevert rendszer homogenitása a feldolgozás során még tovább javul. Amikor a polimer ömledék állapotba kerül, akkor az ömledék, mint folyadék és a szilárd adalékok közt valósul meg keveredési folyamat. Ha egymással kompatibilis polimereket keverünk össze ömledék állapotban, akkor a keveredés két folyadék közt jön létre. Ezeken kívül beszélhetünk még a keveredésről folyadék és gáz halmazállapotú anyagok között is, ami a polimerfeldolgozás szempontjából a celluláris szerkezetű anyagok gyártásánál fontos [7].

A keveredési folyamatokat gyakran meg szokták még különböztetni aszerint, hogy az alkotók molekulái miként rendeződnek. Disztributív keveredésről beszélhetünk akkor, ha a molekulák eloszlása a mátrixon belül egyenletesebbé válik és diszperzív keveredésről, ha a molekulák mérete csökken a folyamat során. Tipikusan diszperzív keveredés a polimerben elosztatott pigmentekből álló agglomerátumok felőrlése. Disztributív keveredésre példa a mesterkeverék elosztatása a polimer granulátumban [7].



5. ábra Diszperzív keveredés [7]



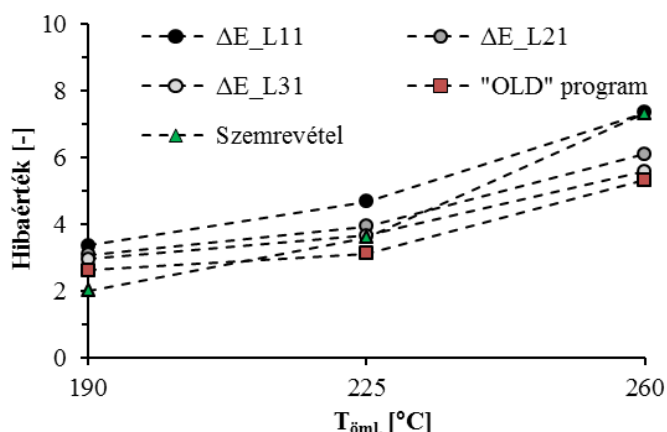
6. ábra Disztributív keveredés [7]

Keveredés közben akkor javulhat a keverék homogenitása, ha az alkotók részecskéi közt relatív mozgás van. Ez megvalósulhat diffúzió révén, ami a kis molekulatömegű anyagokra jellemző, polimerek esetén elhanyagolhatóan kicsi, turbulens áramlás formájában, ami a kis viszkozitású anyagoknál jön létre, illetve a kényszerített áramlás

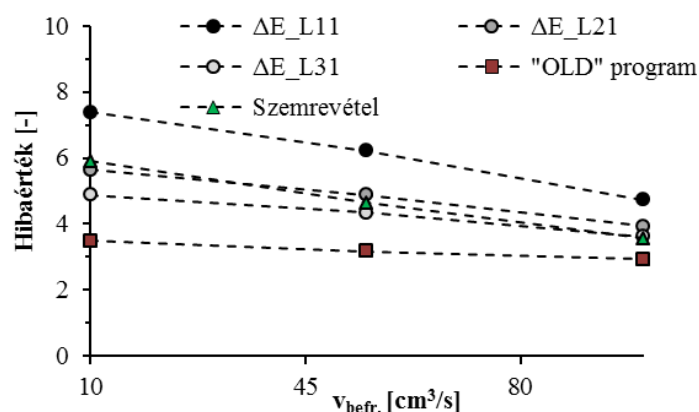
által. Ez utóbbi áramlási forma jellemző a polimerömledékekre. A kényszerített áramlások hajtóereje lehet nyomáskülönbség, vagy valamiféle mozgó peremfeltétel. Tiszta nyomáskülönbség hatására létrejövő áramlás alakul ki például a fröccsöntő gép fűvókájában, vagy az elosztócsatornában. Az aggregátban kialakuló áramlásnál az áramlás hajtóereje a forgó csiga és a nyomáskülönbség [7].

2.2.2. *Technológia helyes beállítása*

A termék színegyenletességét a legolcsóbb módon a fröccsöntő gép paramétereinek helyes megválasztásával javíthatjuk. Számos beállítási lehetőség áll rendelkezésre. A polimer ömledék keveredése annál jobb lesz, minél több nyírást viszünk az anyagba. A bevitt nyírás szoros összefüggésben van az ömledék viszkozitásával, a nyírósebességgel, hőmérséklettel, tartózkodási idővel. Korábbi dolgozat keretein belül foglalkoztam a gépbeállítások színkeveredésre gyakorolt hatásával. A kísérletek során az ömledékhőmérséklet, a befröccsöntési sebesség és tartózkodási idő hatását elemeztem. Ezek közül az ömledék hőmérséklete befolyásolja legjobban a keveredést. A hőmérséklet növekedésével romlik a termékek színegyenletessége (7. ábra). Ez azzal magyarázható, hogy a polimer hőmérsékletének növekedésével csökken annak viszkozitása, így kevesebb nyírást szenved el az anyag a befröccsöntés során. A befröccsöntési sebesség növelésével kis mértékben javul a színegyenletesség (8. ábra). A tartózkodási időnek nincs kimutatható hatása a keveredésre.



7. ábra Az ömledék hőmérsékletének hatása a termékek színhomogenitására



8. ábra A befőröccsöntés sebességének hatása a termékek színhomogenitására

2.2.3. Statikus keverőelemek

A statikus keverőelemek a feldolgozás során nem végeznek mozgást. Az ömledék keverését a zeg-zugos kialakításuk biztosítja, ami az ömledékáramot szétválasztja, majd újra egyesíti és közben folyamatos irányváltoztatásokra kényszeríti azt. Statikus keverőelemeknél a legnagyobb keveredés a legelső keverőelemen valósul meg, a relatív hatásosság a keverőelemeken nem változik, ezért nem indokolt a túl sok keverőelem használata. Fontos feladat a keverőelemek számának optimalizálása a rajtuk létrejövő nyomásesés és a keveredés minősége szempontjából.

A statikus keverők nagy előnye az, hogy a csiga elé beépítve nem csökkentik a hasznos hosszát, a plasztikálási teljesítményt nem befolyásolják. Ezen felül a statikus keverők nem tartalmaznak mozgó alkatrészeket, ezért a meghibásodás valószínűsége kisebb. Ezek a keverőrendszerek a fröccsöntő gépekre integrálhatók és rugalmasan kezelik a technológiai változtatásokat, mint például a gyártás fokozása, vagy az alapanyag színének megváltoztatása [8].

A kereskedelmi forgalomban sokféle geometriájú statikus keverő létezik. Ezek mindegyike különböző és más-más folyamathoz lettek kifejlesztve. A leggyakoribb felhasználási területek az élelmiszeripar, gyógyszer és kozmetikai ipar, festék gyanta és ragasztó ipar, polimer ipar, stb. A keverők kiválasztása az adott folyamathoz nem egyértelmű. Figyelembe kell venni a technológiai beállításokat, az elemeken létrejövő nyomásesést, az elemek alaktényezőjét (L/D). Minden esetben ajánlott a szabványos kialakítások használata. A polimer iparban használt legfontosabb keverő típusok az SMN, SMX, ISG, Kenics típusú keverők [8].

SMN típusú keverő

A Stamixco által kifejlesztett SMN statikus keverő rendszerekben az egymást követő elemek 90°-ban el vannak fordítva egymáshoz képest. A keverőelemek zög-zugos kialakítású belső közfalai a laminárisan áramló polimer ömledéket szétválasztják, majd újra egyesítik. A keverőelemeken áthaladva az ömledék újra kör keresztmetszetű csatornában áramolhat tovább. A keverőelemek hálójá úgy van kialakítva, hogy a háló lapjai ne legyenek merőlegesek a folyási irányra. Keverőháló a polimer ömledéket ékszerűen osztja meg. A keverőelemek hossza rövid, csupán 1-2 cm [6].

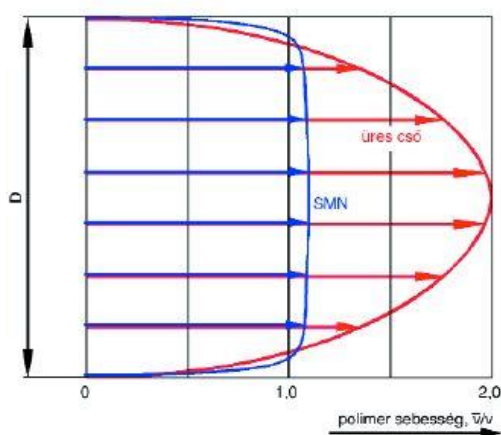


9. ábra StaMixCo SMN statikus keverő [6]

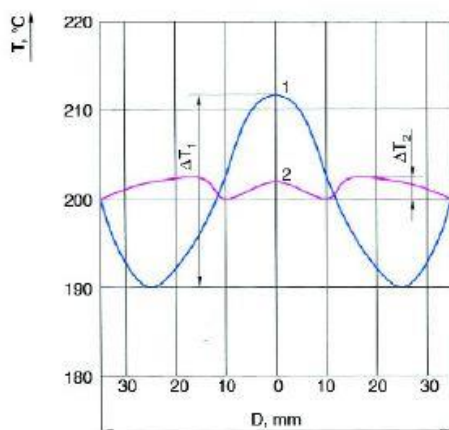
Miután az ömledék elhagyja a csiga homogenizáló zónáját, inhomogenitásokat tartalmazhat, amik a terméken megjelenő foltok, színfátyolosság, vetemedés, egyenetlen zsugorodás kiváltó okai lehetnek. Innentől kezdve már csak a statikus keverődűzzenben keveredik jelentősen az anyag. A keverőelemek előtt a folyási irányra merőlegesen jelentős hőmérséklet és sebességbeli eltérések vannak. A statikus keverők ezt egyenletesítik és emellett a töltőanyagok eloszlását is javítják, disztributívan keverik a

töltőanyag részecskéit. Ezek a típusú keverők a folyási irányban nem szüntetik meg az egyenetlenséget [6].

Schneider Gottlieb és Ungvári Görgy vizsgálták a nyomásesést, hőmérsékletemelkedést ezen a típusú keverő rendszeren, valamint az ömledék és sebességprofil egyenletességét a keverő elem előtt és után. Megállapították, hogy ha a keverési hossz a folyási keresztmetszet átmérőjének aránya 4, akkor az inhomogenitások az ötödére csökkennek a polimer ömledékben. Az ömledék hőmérséklet és a sebességprofil változását a 10. és 11. ábra mutatja. A hőmérsékletemelkedés a keverőelemeken 5°C 100 bar nyomásesésenként.



10. ábra Statikus keverő után és üres csőben kialakuló sebességprofil [6]



11. ábra Hőmérsékleteloszlás a statikus keverő után és üres csőben [6]

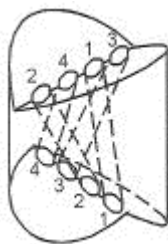
SMN keverő beépítésével csökkenthető a gyártási költség, mivel kevesebb színező anyaggal érhetjük el a kívánt szint. Minél egyenletesebben el tudjuk oszlatni a színezőanyagot a polimer ömledékben, annál jobb színlefedettséget érhetünk el. Reciklált anyag esetén magasabb arányú töltés is elfogadható, ha a reciklált anyag egyenletesen el van oszlatva az alapanyagban [6].

SMX típusú keverő

Az SMX-típusú keverők viszkózus folyadékokhoz kifejlesztett statikus keverők, amelyeknél a nyomásesés mértéke csekély. A Sulzer cég volt a keverőfajta kifejlesztője, a piacra kerülés után elterjedt és a polimerfeldolgozó iparban meghatározó fontosságú keverőtípus. Ez a keverőelem fajta alkalmas kis és nagy viszkozitású anyagok disztributív keverésére is.

ISG típusú keverő

Az ISG keverőelemek tömör kialakításúak. Mindegyik elemen négy furat található. Ezek a furatok nem keresztezik egymást és a folyási iránnyal szöget zárnak be. Az elemek végei precízen megmunkáltak. Két elem közt tetraéderes kamra található. A furatokba való belépéskor az ömledék szétválik, majd mikor a két elem közti kamrába lép be, akkor újra egyesül.



12. ábra ISG keverőelem geometriája [7]

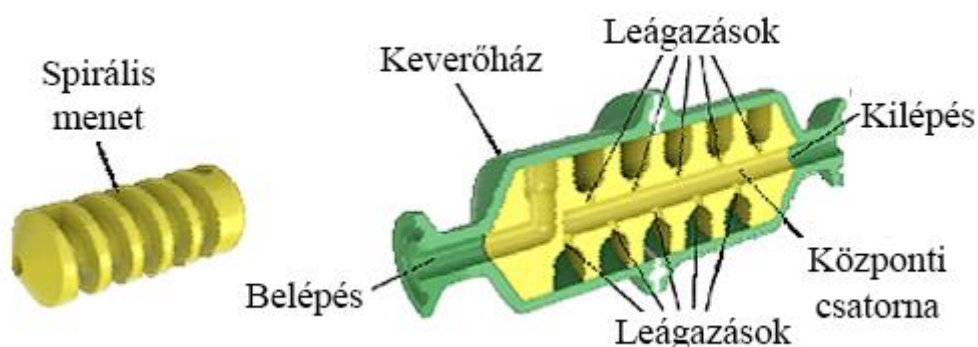
Két komponens bevezetésekor (kör keresztmetszetű csatornában, egymás mellett a két komponens) az első elemen való áthaladás után a két rétegből már nyolc lesz, és ez elemenként négyeszerződik. Tíz elemmel már kétmillió réteg is elérhető. Ezt a típusú keverő rendszert nagy viszkozitású folyadékok keverésére alkalmazzák általában. Az áramlás jellege lamináris. A berendezés a fröccsöntő gép fúvókájának helyére szerelhető fel.

TDM típusú keverő

A TDM típusú keverők egy újfajta keverőrendszer család. Úgy vannak kialakítva, hogy a folyási iránnyal megegyező egyenetlenségeket is csökkentik. A keverőben az áramlás első szakasza csőáramlás, ami egy spirális csatornába torkollik, majd újra kialakul a csőáramlás. Az ömledék először a spirális csatornába kerül, majd innen a spirál

közepén lévő kis átmérőjű csőbe tud tovább áramolni. T. Hanada és társai numerikusan és kísérleti úton vizsgálták a spirális rész keverő hatását a folyási irányban [9].

A TDM-típusú keverők mechanizmusa az időkésleltetésen alapul, a felépítését a 13. ábra mutatja. Amikor a keverő belépési szakaszán olyan ömledék adag lép be, amely nem homogén, az egyszerűség kedvéért tegyük fel, hogy kiugró koncentrációban tartalmaz színezőanyagot, akkor a spirálba való belépés után a vékony leágazásokon áthaladva az aggregátumból darabok szakadnak le. Az a kis darab, amelyik az első elágazásnál leszakad időkésés nélkül a központi csatornába jut, ahol folytatja tovább az útját. A további részeknek egyre nagyobb utat kell megtenniük, amíg a központi csatornába jutnak. Amelyik részecske az első elágazásnál került a központi csatornába az fog először kilépni, a következő elágazásnál leszakadt rész követi és így tovább. Így az agglomerátum kis részekre szakad, valamint a kis részek eloszlása a folyási irányban kiegyenlítődik. Tehát ezen a keverőelem típuson mind diszperzív, mind disztributív keveredés megvalósul [9].



13. ábra ISG keverőelem geometriája [9]

2.2.4. Dinamikus keverőelemek

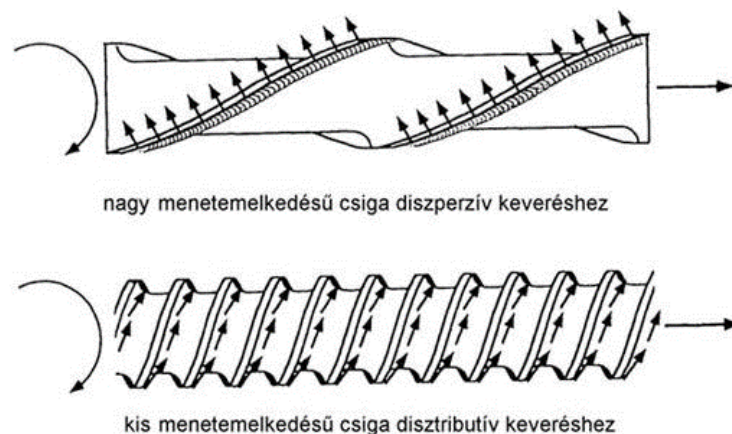
Az olyan keveredést elősegítő elemeket, amelyek valamilyen mozgást végeznek a keveredési folyamat közben, dinamikus keverőelemeknek hívjuk. A fröccsöntött termékek gyártásánál fontos, hogy a keverés a ciklus közben történjen meg. Ez jóval hatékonyabb költség és energia megtakarítás szempontjából.

A csiga keverő hatása

Követve az ömledék útját, az első dinamikus keverőelem a csiga. A csiga egy állandó menetemelkedésű, de változó menetmélységű csavarorsó. A csiga feladata a granulátum megolvasztása és homogenizálása a plasztikálás során, valamint a szerszámüregbe juttatása a befröccsöntési fázisban. A fröccsöntő gépeken használt univerzális csigák kialakításukat tekintve 3 zónásak (behúzó, kompressziós, homogenizáló), egybekezdésűek, az átmérő és a csiga hosszának aránya (L/D) 20 [10].

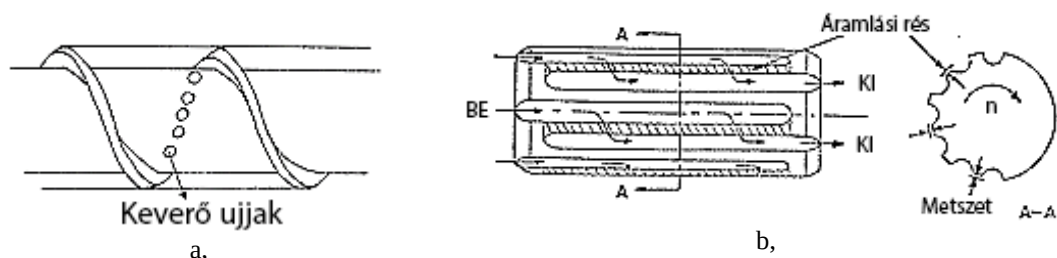
A behúzó zónában még nem történik jelentős keveredés. A kompressziós zónában a csiga menetmélysége csökkenni kezd, a polimer granulátumok egyre jobban hozzászorulnak a henger falához. A súrlódás és a hengerből átadott hő hatására megolvadnak. A csigacsatornában ömledékfilm képződik, ami a csatorna külső részén áramlik és egyre nagyobb nyíróerőt és nyomást gyakorol a még szilárd részekre. A menetmélység fokozatosan csökken, a nyíróerő nő és a maradék szilárd fázis is ömledék állapotba kerül. Az ömledék keveredése ebben a zónában a legjelentősebb. A fellépő nagy nyírás hatására az ömledék anyagrészecskéi deformálódnak, megnyúlnak, átrendeződnek. A homogenizáló zóna végére az ömledéknek homogénnek kell lennie [10, 11].

A keveredés típusát a csiga menetemelkedésének a kialakítása jelentősen befolyásolja. Nagy menetemelkedésű csiga diszperzív keverést, a kis menetemelkedésű csiga disztributív keverést eredményez [10].



14. ábra Fröccsöntő csiga keverő hatása [10]

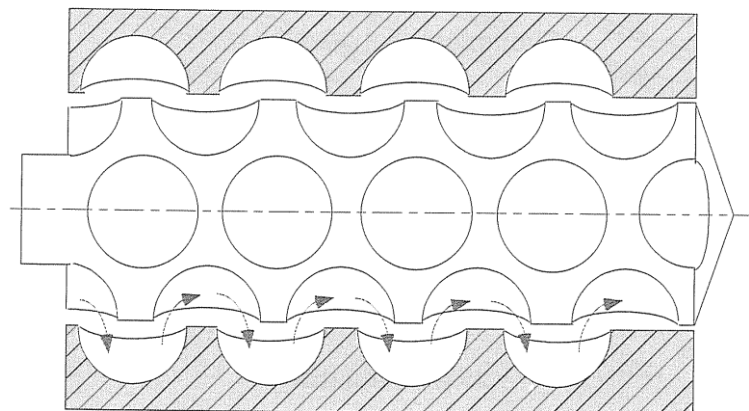
A csiga keverési hatékonyságának növelésére a legegyszerűbb mód a csiga módosítása keverőelemek beépítésével, vagy a geometria módosításával. Ilyen keverőelemek lehetnek például keverő csapocskák (14./a ábra), vagy a csiga elejére felszerelhető keverőcsúcsok (14./b ábra).



15. ábra Fröccsöntő csigára szerelhető keverőelemek, a, keverőujjak b, keverő csigacsúcs [7]

A keverő ujjak a csigacsatornában áramló ömledéket szétválasztják, majd az ujjak közt áthaladó ömledékáram újra egyesül. Emellett az áramlás keresztmetszete is lecsökken, ami a nyírás növekedéséhez vezet. A 15./b ábrán látható keverő csigacsúcs jellegzetessége, hogy az ömledékáramot egy szűk résen kényszeríti keresztül, így érve el a keveredés hatékonyságának növelését [7].

A keverő csigacsúcsok érdemes megemlíteni a Cavity Transfer Mixerek (CTM) csoportját is (). A CTM mixerek egy a csigához rögzített forgórészből és egy állórészből állnak. Mindkét félbe félgömb alakú mélyedések vannak bemunkálva. Az ömledék keresztülhalad az egymáshoz képest forgó alkatrészek közt és közben folyamatosan szétválasztódik, illetve újra egyesül az ömledékáram. Ez a típusú keverő rendkívül hatékony keveredést valósít meg, azonban használata mégsem elterjedt. Ennek oka, hogy az áramlás közel sem ideális a félgömb alakú üregekben, pangó részek vannak az áramlásban. Emellett jelentős nyomáscsökkenés tapasztalható a keverőelemen, aminek következtében csökken a plasztikálási teljesítmény, ezt az is fokozza, hogy a csiga hasznos hosszát rövidítjük a keverő csigacsúcs felszerelésével. A kedvezőtlen áramlási viszonyok és pangó részek rendkívül megnehezítik a CTM keverő tisztítását, ami nagy gondot okoz színváltáskor [7].



16. ábra Cavity transfer mixer (CTM) [7]

Ezen felül még számos csigakialakítás létezik, amelyek növelik a csiga keverő teljesítményét. Ezekről a [7] irodalomban részletes leírásokat találhatunk.

2.3. Fröccsöntésszimuláció

Napjainkban a számítógéppel segített mérnöki munka (CAE) egyre elterjedtebb. A CAE nem csak a geometriai tervezést (CAD) jelenti, hanem magában foglalja a gyártás szimulációját (CAM), valamint a termék optimalizálását különböző szempontból. A szimulációs programok segítségével bonyolult számítások is elvégezhetők, így megoldhatóvá válnak olyan hőtani, reológia, mechanikai problémák, amelyeket analitikus úton nem, vagy csak nagyon nehezen tudnánk leírni. A szimulációs programok analitikus megoldások helyett numerikus közelítést alkalmaznak a számítás során. Köszönhetően a fejlett számítástechnikai eszközöknek, ezek számításigénye ma már nem jelent nehézséget. Egy ezek közül a közelítések közül a végeselemek módszere [11].

Polimer termékek fejlesztési szakaszában is gyakran használnak ilyen programokat. Az első ilyen programokat extrúziós folyamatok szimulációjára használták. A fröccsöntött termékek szimulációja azonban még fontosabb. Egy komplex termék szerszámának a költségei rendkívül magasak, összemérhető a fröccsöntő gép árával. Rengeteg energiát és pénzt takaríthatunk meg azzal, ha már a szerszám tervezési fázisában használjuk a szimulációs programot. Segít a termék fröccsöntéshelyes megtervezésében, például a gátak helyének megválasztásában [11].

2.3.1. Szimulációs nehézségek

A szimuláció során a legnagyobb problémát a bonyolult fizikai folyamatok leírása jelenti. A befröccsöntési fázisban, a szerszámüreg kitöltésekor fellépő jelentősebb számítási nehézségek [12]:

- nagy nyíróerők lépnek fel a kitöltési fázisban a nagy nyírósebességek miatt,
- hőáramlás van a szerszám és a polimerömladék között,
- a beömlő és a gátak környezetében jelentős mennyiségű hő fejlődik, mivel a szűk keresztmetszetben a nyírósebesség jóval nagyobb
- a nyírás, illetve az áramlás nyomásszükséglete függ az anyagminőségtől, leginkább az anyag viszkozitásától,
- a folyamat során az alapanyag tulajdonságai is megváltoznak, miközben az ömladék belép a temperált szerszámba a fal mellett vékony szilárd réteg alakul ki, ami hatással less az áramlási és hőtani folyamatokra.

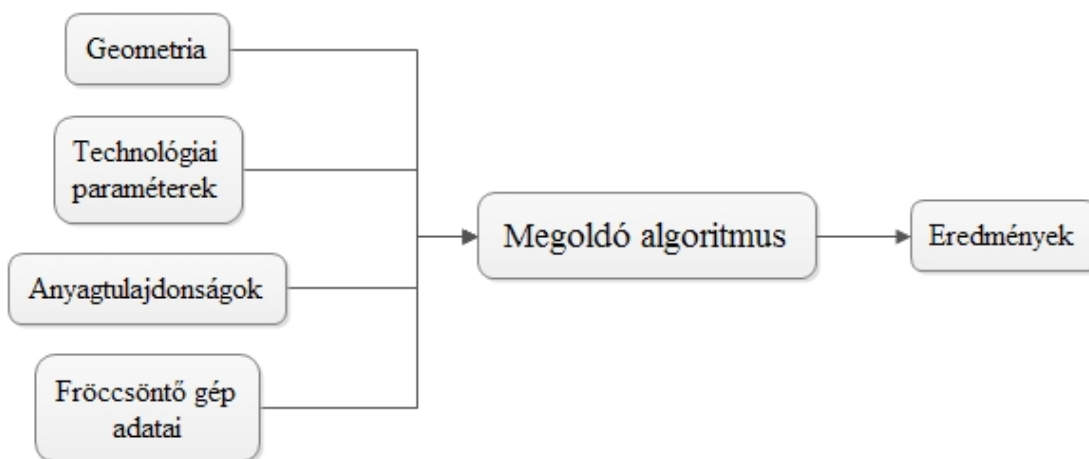
Ezek a folyamatok szoros összefüggésben vannak egymással. A befröccsöntés után az utónyomás következik. Ebben a szakaszban a polimer termék fajtérfogatának változását kompenzáljuk. Ebben a szakaszban a hőtani folyamatok dominálnak. A polimerömladék fázisátalakuláson megy keresztül, ami közben a paraméterei jelentősen változnak. A fajtérfogat változását a hőmérséklet és nyomás függvényében a $p-v-T$ diagramokból tudjuk leolvasni. Az utónyomási szakaszban lejátszódó hőtani folyamatok leírása is komplex, mély matematikai ismereteket igényel [12].

A fizikai folyamatok modellezése mellett a polimer anyagok összetett viselkedése is problémát jelent. Ha csak a fajtérfogat változását vesszük figyelembe, akkor is azt tapasztaljuk, hogy minden polimer eltérően viselkedik. A fröccsöntésszimulációs programokban az anyagokat számításhoz használt paramétereit hatalmas adatbázis tárolja. Ezeket a paramétereket az alapanyaggyártó cég méri ki és teszi közzé [12].

A szimuláció során a termékek és a fröccsöntő szerszám geometriája is okoz nehézséget. Minél bonyolultabb egy termék, annál bonyolultabb szerszám tartozik hozzá. Ha a termékünk és a szerszámunk túl összetett az hálózási problémákhoz vezethet [12].

2.3.2. A szimulációs programok működése

A szimulációs programok egy megoldó algoritmusra épülnek, amelyet segédprogramok egészítenek ki. Például ilyen segédprogram lehet egy geometriai tervező modul is, amivel a termék geometriai modelljét tudjuk előállítani. Ha a szimulációs program nem rendelkezik ilyen modullal, akkor a geometriai modellt CAD programok segítségével hozhatjuk létre [11, 13].



17. ábra A szimulációs programok működése [11]

A szimulációs programok magját a megoldó algoritmus adja, ami a fizikai jelenségeket írja le matematikai modellel és végzi el a számításokat az adott termékhez felépített végeselemes modellen. A számítások során egyszerűsítéseket használunk [11]:

- az elmozdulások lehetnek nagyok, de a feszültségek mindig kicsik,
- a polimer lineárisan rugalmas, izotróp, vagy transzverzálisan izotróp anyag.

Anyagjellemzők, geometriai modell, háló generálás, fröccsparaméterek

Az anyagokra jellemző paramétereket adatbázisokból tudjuk a programba behívni. Erre azért van szükség, mert a polimerek viselkedése összetett. Az anyagok viselkedése csak megfelelő függvényekkel közelíthető. A fröccsöntő szimulációs programokban a fajtérfogat és folyási tulajdonságok leírása a legfontosabb a nyomás és a hőmérséklet függvényében. A fajtérfogatváltozást a p_vT diagram mutatja adott anyagra vonatkozóan. A szimulációs programok a gyakorlatban jobban alkalmazható kéttartományú Tait egyenletet alkalmazzák. A műanyagok reológiai tulajdonságainak változását leggyakrabban a Cross-WLF egyenlet alkalmazásával kezelik a programok. A kiegészítő adatbázisok az egyenletek együtthatóit tartalmazzák, a legfőbb gyártók által forgalmazott alapanyag adatai megtalálhatóak benne [11, 13].

A programoknak két csoportja különböztethető meg aszerint, hogy tudunk-e geometriai modellt létrehozni benne vagy sem. Amelyekben lehet modellt alkotni, azoknak nincs szükségük CAD programra, viszont nem rendelkeznek olyan fejlett tervező modullal. Sok szimulációs program együtt tud működni a CAD programokkal. Itt előre elkészíthetjük a geometriai modellt, majd azt a beolvashatjuk a szimulációs programba. Ezzel könnyebbé, gyorsabbá válik a szimuláció [11, 13].

A termék hálózása szükséges a végeselemes számítások elvégzéséhez. Ez tulajdonképpen annyit jelent, hogy a terméket, amit vizsgálunk, felbontjuk véges számú alkotóra. A háló metszéspontjai lesznek az elemek csúcspontjai. A háló generálása háromféleképpen történhet a szimuláció során [11, 13]:

- középsíkon hálózás,
- felületi hálózás,
- térfogati hálózás.

A középsíkon és felületen történő hálózáskor a modell háromszög elemekből épül fel, a térfogati hálózásnál pedig tetra elemek alkotják azt. A saját tervező modullal rendelkező programok alkalmazzák a középsíkon hálózást. A CAD rendszerekből importált modellek hálózása a felületi hálózással egyszerűbb a már létező modellből. A 3D-s hálón végzett szimuláció számításigénye jóval nagyobb az két előző hálón végzetthez képest, viszont pontosabb eredményeket kaphatunk a bonyolult geometriáknál [11, 13].

A számítások elvégzéséhez szükségünk van még a feldolgozó gép paramétereire. Ezek fizikai korlátokként fognak megjelenni a számításban. Fröccsszimulációnál megadhatjuk a gép záróerejét, a fröccsmunkát stb. A korszerű programok tartalmazzák a forgalmazott gépek jellemzőit egy adatbázisban [11, 13].

2.3.3. *A kitöltési fázis szimulációja*

A TDK munka keretében elvégzett szimulációkkal statikus keverőelemeket vizsgálom. A szimuláció során a kitöltési fázisban vizsgálom a keverőelemeken kialakuló nyomásesést. A nyomásesés a kitöltési fázis során a legjelentősebb a nagy áramlási sebességek miatt [12].

A kitöltési fázis szimulációja a leggyakoribb. A kitöltési folyamat szimulációjával meghatározhatjuk a gát optimális helyét, ami biztosítani fogja a termékünk egyenletes kitöltését. A szimuláció segítségével meghatározhatjuk a nyomás és hőmérsékleteloszlást, az ömledékfront haladását [12].

A számítások során feltételezzük, hogy az ömledék kontinuum. Az ömledék tulajdonságait három fő egyenlet segítségével tudjuk kiszámítani. Ezek az anyagmegmaradás, az energiamegmaradás és az impulzusmegmaradás egyenletei folyadékokra. A szimulációs programok megoldó algoritmusa is ezeket használja fel. Összenyomható polimerömledék esetén a kontinuitás egyenlet a következőképpen írható fel [12]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \underline{v}) = 0 \quad , \quad (2)$$

ahol $\partial \rho / \partial t$ a sűrűség időbeni megváltozása, $\underline{v}$ pedig a sebességvektor. A tétel azt fejezi ki, hogy anyag nem keletkezhet és tűnhet el.

Az impulzusmegmaradás tétele a folyadékrészek mozgása és a rá ható erők közti kapcsolatot írja le. Az áramló közegre kétféle erő hathat, a gravitációs erő és a felületén a szomszéd részecskéről átadódó erő. Ezeknek az erőknek az eredője változtatja meg a folyadékrész mozgásmennyiségét. Ha a súrlódást elhanyagolnánk a folyadékban, akkor a folyadékrészre csak nyomásból származó erő hanta, azonban súrlódásos esetben a felületen nyíróerők is hatnak. Polimerömlédek esetén a mozgásállapot és a folyadékra ható erők közti kapcsolatot a 3. összefüggés írja le [14].

$$\frac{d\underline{v}}{dt} = \underline{g} + \frac{1}{\rho} \underline{\sigma} \nabla \quad , \quad (3)$$

ahol $\underline{v}$ a sebességvektor, $\underline{g}$ a gravitációs térerősség, $\underline{\sigma}$ pedig a feszültségtenzor. Ezt az egyenletet akkor tudjuk használni, ha találunk összefüggést a feszültségtér és a sebességállapot közt. A csúsztató és húzófeszültségek az alakváltozás segítségével kifejezhetők, ez adja meg a kapcsolatot, amire szükségünk van a további számítások elvégzéséhez [14].

Ha ezt kifejtjük három egyenletet kapunk (x, y, z irányú komponens) amelyben hat ismeretlen szerepel. A sűrűség és a dinamikai viszkozitás szerepelnek ezekben az egyenletekben. Ezek meghatározására be kell vezetni még egy ismeretlent, a hőmérsékletet. Így felírható egy következő egyenlet, ami a nyomás, sűrűség és a hőmérséklet közt teremt kapcsolatot és egy további, ami a viszkozitás, hőmérséklet és nyomás közt. Ezeken felül szükségünk van még az energiamegmaradást kifejező egyenletre. A 4. összefüggés a közeg által és a közegen végzett munka valamint a belső és mozgási energia közt írja le a kapcsolatot polimerek esetén [14, 15].

$$\eta \dot{\gamma}^2 + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = \rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} v_x + \frac{\partial T}{\partial y} v_y + \frac{\partial T}{\partial z} v_z \right] \quad (4)$$

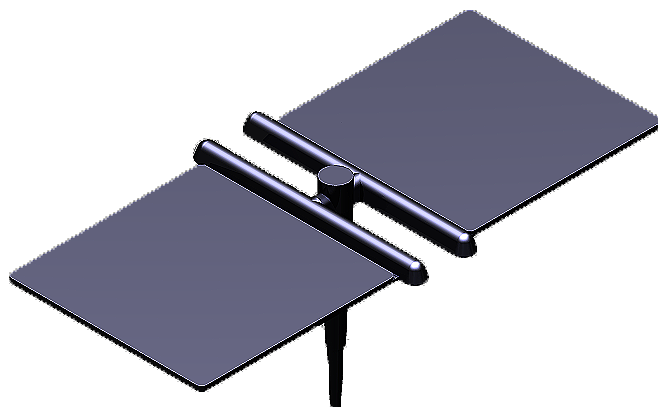
ahol η a dinamikai viszkozitás, γ a nyírás, λ a hővezetési tényező, T a hőmérséklet, ρ a sűrűség, c_p a fajhő, $\underline{v}$ a sebesség, t pedig az idő.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

A következőkben a TDK munka méréseihez felhasznált gépek, alapanyagok és mérési módszerek kerülnek bemutatásra, illetve szó lesz még a szimulációs vizsgálatokról is.

3.1. Alkalmazott berendezések

A 80x80x2 mm-es lapka próbatestek *Arburg Allrounder Advance 370S 700-290* fröccsöntő gépen, kétfézszes szerszámban lettek legyártva. A mérések során és a vizsgálatokhoz különböző belső átmérőjű és különböző elemszámú *StamixCo SMN* típusú statikus keverőket használtam. A statikus keverők belső átmérője 18, 22, 27 mm volt. A 22 mm belső átmérőjű statikus keverő esetében 5, 7 és 8 keverő elemet alkalmaztam, a 18 mm belső átmérő esetén 5 keverő elemet, míg a 27 mm belső átmérőjű keverőben 8 elemet. A próbatesteket *Epson Perfection V600 Photo* síkágyas lapszkennerrel digitalizáltam. A szkennер maximális felbontása 6400 dpi, a maximális munkatere pedig 216x297 mm. A szkennерben LED fényforrások találhatók [16].



18. ábra 80x80x2 mm-es lapka próbatest beömlő- és elosztórendszerrel

3.2. Felhasznált anyagok

A TDK munka elkészítése során ABS terpolimert (*Styrolution, Terluran GP-35*) használtam, amelyhez rózsaszín (*Clariant, Renol-pink ABSI 43479Q*) mesterkeveréket adalékoztam [16].

3.3. Mérési módszerek

A próbatesteket minden esetben azonos technológiai paraméterek mellett gyártottam, keverő nélkül, illetve különböző elemszámú és belső átmérőjű statikus keverők alkalmazásával az alábbi technológiai beállítások mellett:

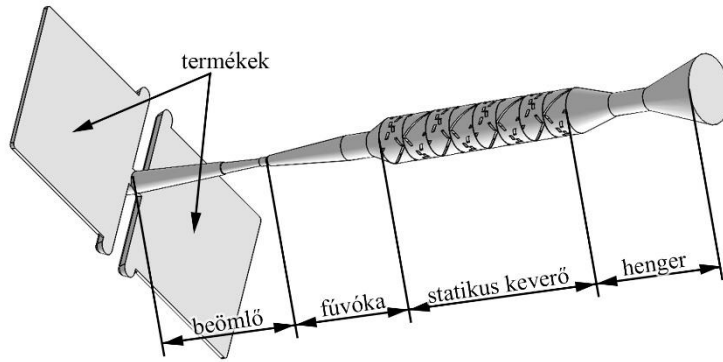
2. táblázat A fröccsöntő gép beállításai

Beállítási lehetőség	Érték
Csiga kerületi sebessége	25 mm/perc
Torlónyomás	60 bar
Adagolási térfogat	42 cm ³
Befröccsöntés sebessége	55 cm ³ /s
Ömledékhőmérséklet	225°C
Szerszámhőmérséklet	40°C

A színegyenetlenségek mérése céljából a próbatestek mozgó szerszámfél felőli oldalát digitalizáltuk 200 dpi felbontással, a sík ágyas lapszkennerral. A szimulációs számításokat *Autodesk Moldflow Insight 2014* fröccsöntés-szimulációs szoftverrel végeztem el.

3.3.1. Nyomásesés meghatározása szimulációs szoftverrel

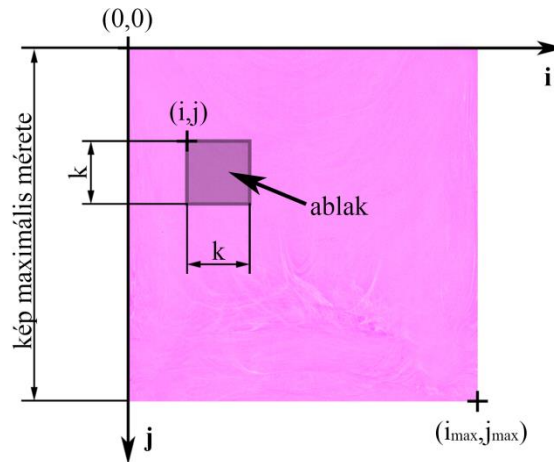
A fröccsöntés közben, a statikus keverőn fellépő nyomásesést vizsgáltuk a szimulációs modellekkel a kitöltési fázisban. A szimulációs modellek geometriája a 17. ábrán látható. A modell a fröccshenger csiga előtti részéből, a statikus keverő belső geometriájából, a fűvókából, beömlő és elosztó rendszerből, valamint a lapka próbatestből áll [16]. A szimulációkhoz térfogati hálótípust használtam, 0,5 mm-es átlagos élhosszal, amit a CAD modell bonyolultsága indokolt. A számítások során a beállított technológia paraméterek megegyeztek a fröccsöntő gépen használt beállításokkal.



19. ábra Szimulációs számításokhoz használt CAD modell (8 elemes, 22 mm) [16]

3.3.2. Színegyenetlenség mérése

A színezőanyagok eloszlátottságának a mérésére a *BME Polimertechnika Tanszék* által kifejlesztett szoftvert használtam. A szoftver fröccsöntött termékekről, próbatestokről készített digitális képek elemzésére alkalmas. Az elemzéshez .bmp formátumú képekre van szükség. Első lépésben a kép pixeleihez tartozó színkoordináták RGB színértékeit Lab színértékekké konvertál. A képek vizsgálatakor egy négyzetes, mozgó ablakkal, pixelről pixelre végigpásztázza a képet a szoftver (18. ábra). A mozgó ablak oldalhossza (k) 2 pixel és a kép rövidebb oldalhossza között választható meg. Minden ablakpozícióban kiszámításra kerül az ablakon belül elhelyezkedő képpontok átlagos Lab színértéke. Minden ablakpozícióban és választott ablakméretben kiszámoljuk az ablakon belül elhelyezkedő pixelek színkoordinátáinak Euklideszi távolságát az ablakon belüli pixelek átlagos színértékétől. Ez az érték a két színérték által meghatározott színek közti eltérését jellemzi. Ezután vesszük az előbb kiszámolt eltérések átlagát (MD_k). Az adott ablakmérethez tartozó MD_k értékek közül a legnagyobbat (HMD_k) használjuk fel a kép színegyenetlenségének jellemzésére. A maximális ablakmérethez tartozó MD érték (GMD) a teljes képre jellemző.



20. ábra Színegyenetlenséget mérő programban használt paraméterek [16]

Előzetes kísérletek alapján, amelyekben a szoftver által generált hibaértékeket hasonlítottam össze emberek által adott hibapontszámokkal, arra a következtetésre jutottunk, hogy a HMD_k értékek nem korrelálnak megfelelő mértékben az emberek által adott pontszámokkal. További vizsgálatok eredményeként definiáltam egy korrigált hibaértéket (1), ami már 0,9 feletti értékkel korreláltatható a humán pontszámokhoz. A továbbiakban ezt használom a képek színegyenetlenségének jellemzésére.

$$Hibaérték = 5 \cdot [\log(HMD_{35} - GMD) + 1], \quad (1)$$

ahol HMD_{35} a 35 pixel oldalhosszúságú mozgó ablakhoz tartozó hibaérték, GMD pedig a teljes képre vonatkozó hibaérték.

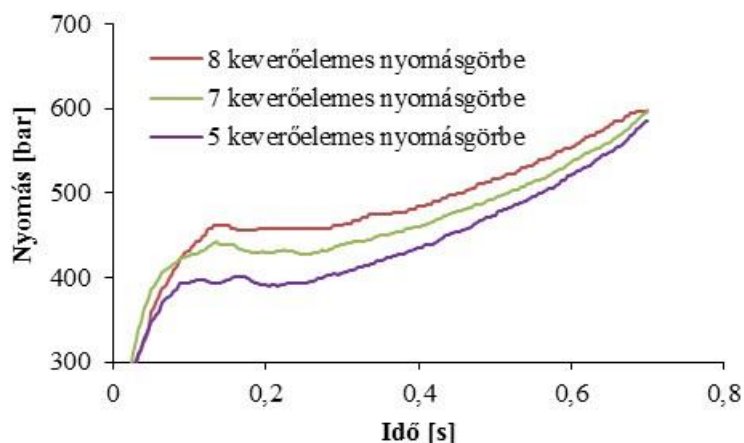
4. STATIKUS KEVERŐK MINŐSÍTÉSE

A TDK munka keretein belül az SMN típusú statikus keverőt részletesen vizsgáltam. Ebben a fejezetben lesz szó az elvégzett mérésekről és azok eredményeiről, valamint az ezekből levont következtetésekről.

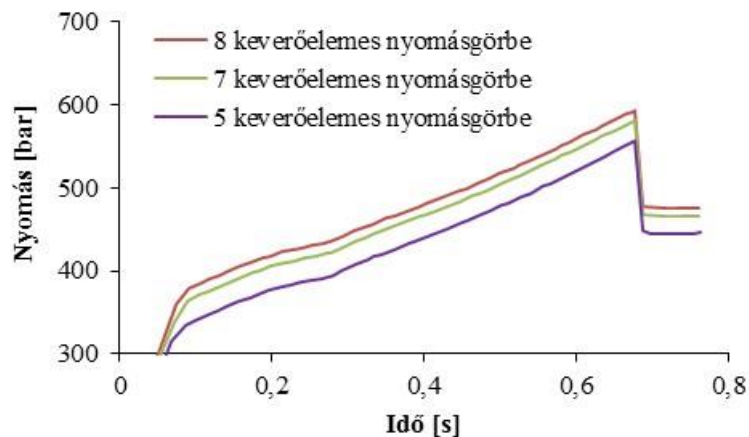
4.1. Statikus keverőn fellépő nyomásesés vizsgálata

Gazdasági szempontból igen fontos tudni, hogy a keverő alkalmazása milyen hatással lesz a fröccsöntési ciklusra. Bonyolult, zeg-zugos kialakítása miatt, jelentős nyomástöbbletre van szükségünk ahhoz, hogy a polimer ömledéket keresztülnyomjuk rajta. A nyomásigény növekedését több tényező is, mint például a keverőben használt keverőelemek száma és belső átmérője jelentősen befolyásolja.

Első lépésben a szimulációs és a mérési eredmények közti eltéréseket vizsgáltam, hogy a későbbiekben felhasználhassam a szimulációs eredményeket olyan mérési összeállítások minősítésére, amelyekhez nem álltak rendelkezésemre a megfelelő eszközök a mérések elvégzéséhez. Az eredmények kiértékelésénél a fröccsöntő gépen mért és a szimulációs szoftverrel számított nyomásgörbékét hasonlítottam össze. A 19. és 20. ábrán az 5, 7 és 8 keverőelemes 22 mm belső átmérőjű statikus keverőn mért és ezek modelljein számított nyomásgörbék láthatók.



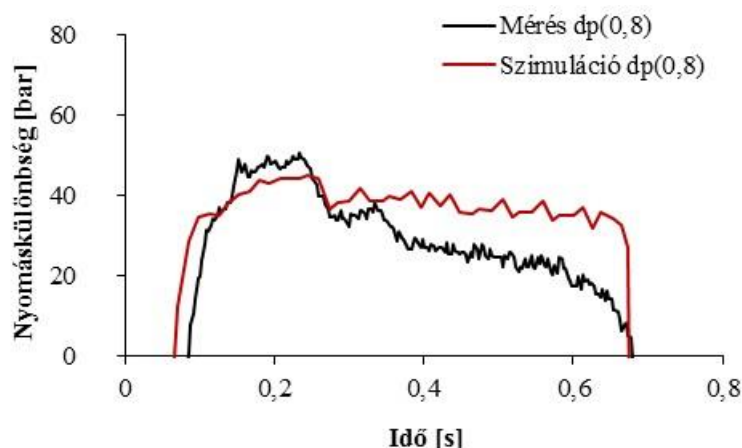
21. ábra Fröccsöntő gépen mért nyomásgörbék



22. ábra Szimulációs szoftverrel számított nyomásgörbék

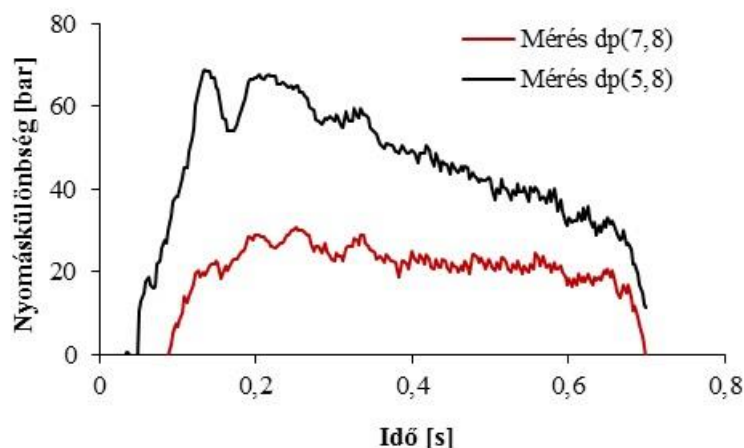
Az eredmények könnyebb összehasonlítása érdekében minden mérésből és szimulációból kapott nyomásgörbét úgy toltam el az időben, hogy az átkapcsolási pont mindig ugyanabban az időpillanatban, 0,7 s-nél történjen. A nyomásgörbék alapján elmondható, hogy a szimulációs számítások jó közelítéssel megfelelően modellezik a valóságot.

Ezután megvizsgáltam, hogy a statikus keverő alkalmazása milyen hatással van a fröccsöntési ciklusra. Ehhez a fröccsöntő gép hagyományos fúvókáján és a 8 keverőelemes 22 mm belső átmérőjű statikus keverőn fellépő nyomáseséseket hasonlítottam össze. A 21. ábrán a két mérési összeállítás nyomásgörbéi közti különbségek láthatóak, tehát a görbékről leolvasható, hogy az adott időpillanatban mennyivel volt nagyobb a nyomásesés 8 keverőelemes fúvókán, mint a keverőelem nélkül. A Mérés $dp(0,8)$ a fröccsöntő gépen mért hidraulikanyomásból számított nyomásgörbék közti különbségeket mutatja, a Szimuláció $dp(0,8)$ pedig a szimulációs programmal számított nyomásgörbék közti különbséget. A $dp(x,y)$ jelöli meg, hogy melyik két összeállítás közti nyomáskülönbségről van szó.



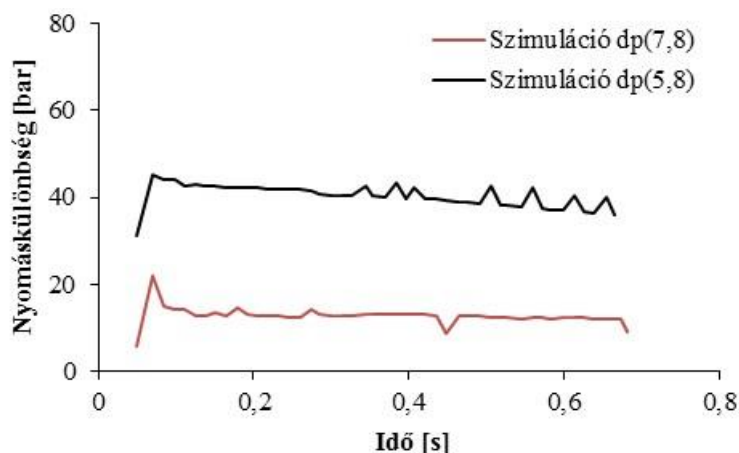
23. ábra A fröccsöntéshez szükséges nyomásigény változása 8 keverőelemes 22 mm belső átmérőjű statikus keverő esetén a keverőelem nélküli esethez képest

Az **23.** ábrán látható szimulációs és mért adatokból számított nyomásgörbék különbségéről szintén elmondható, hogy a fröccsöntés során kialakuló nyomásviszonyokhoz képest, a köztük lévő eltérés, ami körülbelül 5-10 bar, elhanyagolható. A mérések eredményeit megfigyelve látható, hogy a keverőelem nélküli és a 8 keverőelemes nyomásgörbék közti különbség a kitöltési fázis vége felé haladva folyamatosan csökken. Ez nem figyelhető meg a szimulációs eredményeken. Az eltérés oka, a számítások során alkalmazott egyszerűsítésekből adódik. A szimulációs programok nem számolnak az ömledék nyírás hatására történő felmelegedésével. A mérések eredményeiben megfigyelhető csökkenésnek ez lehet az egyik oka, mivel a kitöltési fázis során az ömledékbe egyre nagyobb nyírást viszünk, az felmelegszik, viszkozitása lecsökken és javul a folyóképessége. Ezután további szimulációs számításokat és méréseket végeztem el a 22 mm belső átmérőjű statikus keverőkön, majd összevetettem a fröccsöntéshez szükséges nyomásigény változását a különböző elemszámú statikus keverők alkalmazása esetén. A **22.** ábrán az 5, 7 és 8 elemes keverők összehasonlítása látható.



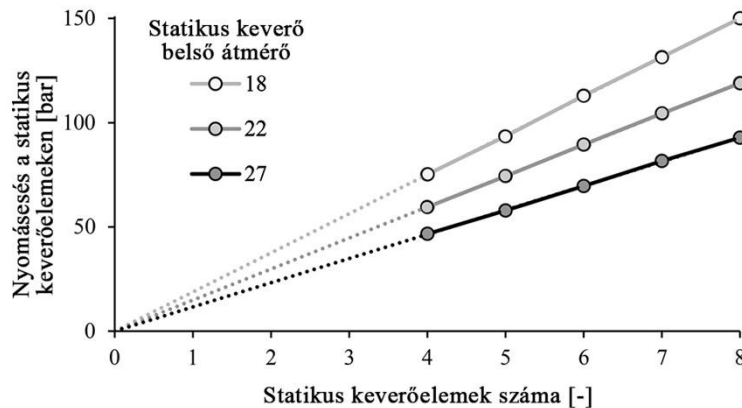
24. ábra A fröccsöntéshez szükséges nyomásigény változása az elemszám függvényében a 22 mm belső átmérőjű statikus keverő esetén (mérésekből)

A 24. ábra alapján elmondható, hogy 8 keverőelem alkalmazása 7 helyett körülbelül 20 bar nyomástöbbletet igényel a mérések szerint, illetve az 3 plusz keverőelem használata körülbelül 60 bar nyomásigény növekedést eredményez. Ugyanezt a vizsgálatot elvégezve a szimulációs számításokkal (23. ábra) azt tapasztaljuk, hogy a nyomásigény növekedése az előző esetben 15 bar, az utóbbi esetben körülbelül 45 bar, ami nem sokban tér el a mért értékektől.



25. ábra A fröccsöntéshez szükséges nyomásigény változása az elemszám függvényében a 22 mm belső átmérőjű statikus keverő esetén (szimulációból)

Az előzőek alapján elmondható, hogy a szimuláció alkalmas a további mérési összeállítások elemzésére is. A számításokat elvégeztem a 18 és 27 mm belső átmérőjű statikus keverőkre is 4, 5, 6, 7 és 8 keverőelem alkalmazása esetén. Ahhoz, hogy a meghatározzam az egyes keverőelemek által okozott abszolút nyomásesést, a szimulációs számításokhoz elkészítettem a statikus keverők modelljeit keverőelemek nélkül (18, 22 és 27 mm belső átmérővel). A továbbiakban ezt használtam referenciaként.

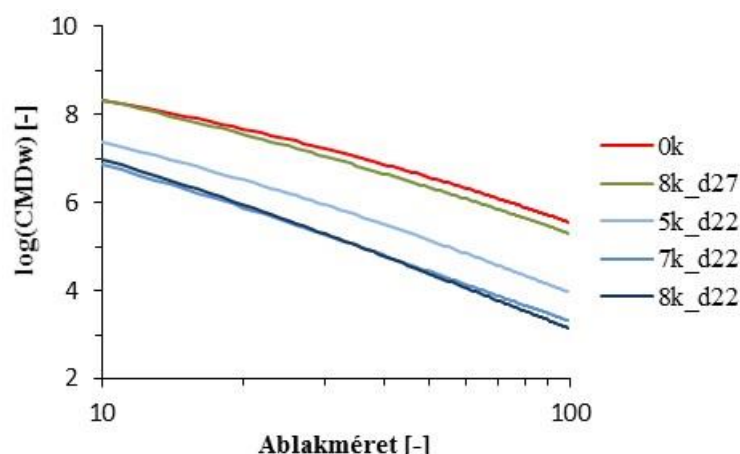


26. ábra Statikus keverőn fellépő nyomásesés az elemszám és a belső átmérő függvényében (szimuláció)

A 26. ábra a nyomásesések különbségének az átlagát ábrázolja a különböző belső átmérőjű és elemszámú statikus keverőkön a kitöltési fázisban. Az ábra alapján elmondható, hogy az átmérő csökkenésével jelentős nyomástöbbletre van szükség az azonos áramlási viszonyok fenntartásához, valamint az is, hogy a nagyobb belső átmérővel rendelkező statikus elemek egyenként jóval kisebb nyomásesést okoznak. A 27 mm belső átmérőjű statikus elemek körülbelül 10 bar, a 22 mm belső átmérőjű elemek 15 bar, a 18 mm-es elemek pedig nagyjából 20 bar nyomásesést eredményeznek. Ha úgy döntünk, hogy a keverőelem nélküli eset helyett egy 8 keverőelemes kis átmérőjű statikus keverőt alkalmazunk, az akár 150 bar nyomásigény növekedést is eredményezhet. Ennek jelentős költségvonzatai lehetnek a megnövekedett nyomásigény miatt, vagy akár a fröccsöntő gép korlátait is túlléphetjük. Egy nagyobb gép üzemeltetése szintén jóval drágább, tehát fontos, hogy megvizsgáljuk, valóban megéri-e az adott összeállítás használata.

4.2. Statikus keverő homogenizáló képességének minősítése

Ebben a fejezetben a meglévő keverők homogenizáló képességét vizsgáltam, a lapka próbatestek színének elemzésével. A próbatest színegyenletlenségének mérésére 3.3.2-es fejezetben ismertetett programot használtam.



27. ábra Statikus keverőelemek számának hatása a próbatestek színegyenetlenségére

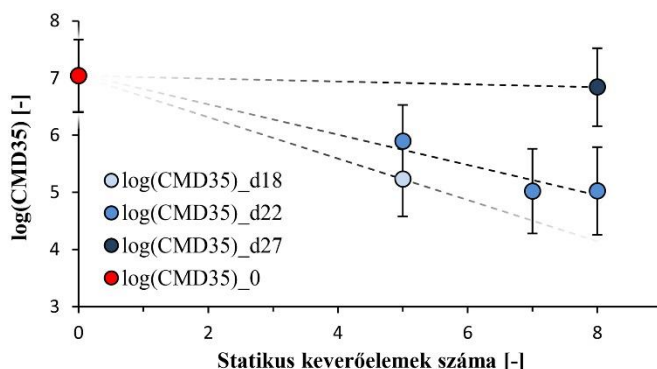
A mérések során a keverőelem nélküli, az 5 keverőelemes 18 mm-es, az 5, 7 és 8 keverőelemes 22 mm-es és a 8 keverőelemes 27 mm belső átmérőjű összeállításokat vizsgáltam. Az eredményeket a 27. ábra mutatja, amin a korrigált hibaértékek láthatók az ablakméret függvényében egy logaritmikus transzformáció után. A korrigált hibaértékek (CMD_w) a 2. összefüggés alapján számíthatók.

$$CMD_w = HMD_w - GMD. \quad (2)$$

A képek színe annál egyenletesebb, minél kisebb ez az érték. Az ablakméret növelésével a program az egyre nagyobb kiterjedésű hibákat képes detektálni és ez alapján adja meg a kép hibaértékét. Kis ablakméretnél a pontszerű, kis kiterjedésű hibák dominálnak, és ezek alapján kap a kép egy hibaértéket. Ahogy a 27. ábra is mutatja, ezek a hibaértékek az ablakméret függvényében csökkennek. Az eredmények alapján elmondható, hogy a 27 mm belső átmérőjű statikus keverő még 8 elem alkalmazásával sem ért el sokkal jobb keveredést, mint a keverőelem nélküli fűvóka. A kis ablakméretű tartományban, nincs is különbség a két mérési összeállítás közt. Ennek az egyik lehetséges oka az, hogy ez a belső átmérőjű keverő nagyobb fröccsöntési adagsúly mellett működik jól a gyártó szerint. A 22 mm belső átmérőjű keverők esetében jól látható a minőségjavulás a keverőelem nélküli fűvókához képest. Már 5 keverőelem alkalmazása is jelentősen növeli a termékek homogenitását, amit a 7 és 8 keverőelem alkalmazása még tovább javított. A 7 és 8 elemes keverők közti különbség azonban igen csekély, ami nem indokolja a 8 keverőelem használatát ennél az összeállításnál.

A színegyenetlenséget mérő program előzetes tesztelése azt mutatta, hogy a 35 pixel oldalhosszúságú ablakmérethez tartozó HMD_{35} értékek korrigálnak a legjobban az emberi színérzékeléséhez. Az előkísérlet méréseit képzett technikusok által adott

hibapontszámokkal vetettük össze. A minták több színű és különböző technológiai beállítással készült lapka próbatestek voltak.



28. ábra Statikus keverőelemek számának és belső átmérőjének hatása a próbatestek inhomogenitására

A 28. ábrán a vizsgált keverőkkel gyártott minták hibaértékeit láthatjuk, amikből megállapítható, hogy a keverőelemek száma és a homogenitás javulása közti kapcsolat logaritmikus. Ez alátámasztja azt, hogy a legnagyobb mértékű keveredés az első keverőelemen megy végbe és az utolsó elem felé haladva csökken. Az eredmények alapján az is elmondható, hogy a keverők belső átmérőjének csökkenésével nő a keveredés hatékonysága azonos áramlási sebesség mellett. A 28. ábrán a meglévő mérési eredményekre illesztett egyenesek meredeksége az elemek keverési hatékonyságával van kapcsolatban.

4.2.1. A statikus keverő minősítése

A mérések alapján megállapítható, hogy a 27 mm belső átmérőjű statikus keverő nem befolyásolja jelentősen a keveredést az adott technológiai beállítások, alapanyag és színezőanyag mellett. Ennek legfőbb oka a befröccsöntésnél alkalmazott kis adagsúly, ami ekkora keverő esetén nem optimális a keveredés szempontjából. A 22 mm-es statikus keverő esetén 7-nél több elem használata nem indokolt, ugyanis a 7 és 8 elemes keverővel gyártott sorozatok homogenitása közt nincs szignifikáns eltérés. A 18 mm átmérőjű statikus keverővel értem el a legjobb keveredést, itt már 5 elem alkalmazásával elértem azt a homogenitási szintet, amit a 22 mm-es esetben csak 7 és 8 elem segítségével tudtam. Azonban a kis átmérő jelentős nyomásigény növekedést eredményez, ami üzemeltetési oldalról jelentős költségeket von maga után. Minél nagyobb nyomások ébrednek a befröccsöntési fázisban, annál több energiát kell a folyamatba fektetni.

5. ÖSSZEFOGLALÁS/EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

5.1. Eredmények

A TDK munka keretein belül megismerkedtem polimerek színezésének alapjaival, ezen belül a színezéshez használt adalékokkal, ezek elkeverésének lehetőségeivel, kiemelten kezelve a statikus keverőket, valamint a keveredés alapvető mechanizmusaival. Átfogó irodalomkutatót végeztem a fröccsöntési folyamat szimulációjának lehetőségei, a szimulációs programok működésének témakörében. A dolgozat gyakorlati részében részletesen tanulmányoztam a StaMixCo cég által forgalmazott SMN statikus keverőn fellépő nyomásesés és a rajtuk létrejövő keveredés hatékonyságának kapcsolatát. A nyomáseséseket néhány mérési összeállításban mérések és szimulációs program segítségével is meghatároztam. A szimulációs számításokat a mérések alapján megfelelőnek minősítettem arra, hogy a számításokat kiterjesszem más mérési összeállítások vizsgálatára is. A szimulációs számítások azt mutatták, hogy ennél a típusú keverőnél minden plusz keverőelem beépítése 20, 15 és 10 bar nyomásigény növekedést okoz a 18, 22 és 27 mm átmérőjű esetben. A nyomásesések függvényében vizsgáltam a keveredési hatékonyságot is és megállapítottam, hogy a 27 mm belső átmérőjű keverő alkalmazásával nem érünk el jelentős javulást a termék színének egyenletességében. A 22 mm belső átmérőjű statikus keverő használatával már javul a termék minősége, azonban 7-nél több keverőelem alkalmazása már nem éri meg, mivel a termék homogenitása nem különbözik szignifikánsan a 8 keverőelemmel gyártott termékekétől. A 18 mm átmérőjű statikus keverővel tovább javítható a termék színének homogenitása, viszont ennek alkalmazásával jelentős nyomástöbbletet igényel a gyártás, ami hosszú távon jelentősen növeli a költségeket. A szimulációs számítások szerint 8 keverőelem alkalmazása a nyomásigényt 150 bar-al növeli meg. Ez már összemérhető a fröccsnyomással.

5.2. Távlati célok

Jövőbeni terveim közt szerepel a vizsgált statikus keverő további vizsgálata, mivel eszközök hiányában még nem tudtam minden mérési összeállítás esetén megvizsgálni a keveredés hatékonyságát.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Smith A., Small B.: Cikk címe. Újság Neve, 1, 48-58 (2004).
2. F. W. Billmeyer, M. Saltzman: Principles of Color Technology, John Wiley & Sons Inc., New York, (1981).
3. A. Müller: Coloring of Plastics, Carl Hanser Verlag, Munich, (2003).
4. J. Murphy: Additives for Plastics Handbook, Elsevier Science Ltd., Oxford, (2001).
5. R. D. Deanin: Additives in Plastics, Environmental Health Perspectives, Vol. 11, 35-39, (1975).
6. Dr. Bánhegyi Gy.: Ömledék homogenitásának javítási lehetőségei fröccsöntésnél és extrúzióánál, Műanyagipari szemle, 6/4, (2008).
7. C. Rauwendaal: Polymer Mixing: A Self-Study Guide, Carl Hanser Verlag, Munich, (1998)
8. R. K. Thakur, Ch. Vial, K. D. P. Nigam, E. B. Nauman, G. Djelveh, Static mixers in the process industries - a review, Institution of Chemical Engineers, (2003)
9. T. Hanada, T. Okada, K. Takahashi: Development of New Static Mixer to Reduce Unevenness in Flow Direction, European Conference on Mixing, Warszawa, Lengyelország'14, 145-150, (2012)
10. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, (2000)
11. Dunai A., Macskási L.: Műanyagok fröccsöntése, Lexica Kft., Budapest, (2003)
12. P. K. Kennedy: Practical and Scientific Aspects of Injection Molding Simulation, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, (2008)
13. Kovács J. G., Fröccsöntött termékek tervezése és szimulációja, Phd dissertation, (2007)
14. Lajos Tamás.: Az áramlástan alapjai, Egyetemi tankönyv, Budapest, (2008)
15. W.-H. Yang, A. Peng, L. Liu, D. C. Hsu, R.-Y. Chang: Integrated numerical simulation of injection molding using true 3D approach, Society of Plastics Engineers, Taiwan, 2004
16. Török D., Dr. Kovács J. G., Zsíros L.: Különböző elemszámú és átmérőjű StaMixCo statikus keverők vizsgálata, Műanyag és Gumi, 51/9, 346-351 (2014).