



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

TÖRÖK DÁNIEL
DIPLOMATERV

STATIKUS KEVERŐK MINŐSÍTÉSE FRÖCCSÖNTÉSI
TECHNOLÓGIÁBAN VALÓ OPTIMÁLIS ALKALMAZÁSHOZ

Témavezető:

Dr. Kovács József Gábor
egyetemi docens

Konzulensek:

Suplicz András

tanársegéd

Szabó Ferenc

tanársegéd

Zsíros László

folyamatmérnök

BUDAPEST, 2014

Szerzői jog © Török Dániel, 2014.

Ez a diplomaterv elzártan kezelendő és őrzendő, a hozzáférés a vonatkozó szabályok szerint korlátozott. A hozzáférés korlátozása és a zárt kezelés 2019. év december hónap 31 napján ér véget.

Ide kell befűzni az eredeti feladatkiírási lapot!

A feladatkiírás hátoldala!

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ez a diplomaterv a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Diplomatervezési és Szakdolgozat feladatokra előírt tartalmi és formai követelménynek megfelelően készült. E diplomatervet a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2014. december 12.

témavezető

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 diplomatervet 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. december 12.

szigorló hallgató

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani az ARBURG Hungária Kft-nek, hogy rendelkezésünkre bocsátotta az ARBURG Allrounder 370S 700-290 típusú fröccsöntő gépet. Köszönjük továbbá a Lenzkes GmbH-nak a szerszámfelfogókat.

Szeretnék továbbá köszönetet mondani a konzulenseimnek, akik készséggel álltak rendelkezésemre, ha olyan problémába ütköztem, amit nem tudtam egyedül megoldani. Köszönöm Dr. Kovács József Gábornak, aki összefogta az egész csapatot és instrukcióival segítette a dolgozat fejlődését és megfelelő irányba terelte a kísérleteket. Továbbá szeretném megköszönni Suplicz Andrásnak és Szabó Ferencnek, akik hetente akár többször is leültek velem konzultálni, hogy a dolgozat még jobb legyen. Köszönet illeti még Zsíros Lászlót, aki sok hasznos cikkel látott el, fröccsöntés és színezés témakörben.

TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás	vi
Jelölések jegyzéke.....	ix
1. Bevezetés és célkitűzés	2
2. Szakirodalmi áttekintés	4
2.1. Töltő-, erősítő- és adalékanyagok.....	4
2.1.1. Gyakori töltő- és erősítőanyagok a hővezetés javítására	4
2.1.2. Egyéb gyakran használt adalékanyagok	8
2.2. A polimerek színezése	10
2.2.1. Színek, színek azonosítása, szinterek.....	10
2.2.2. Színezékek és adalékok típusai	13
2.2.3. Színezékek csoportosítása összetételük szerint	16
2.3. Aggregátumok felbontása	16
2.3.1. In situ polimerizáció	17
2.3.2. Oldatos keverés	17
2.3.3. Ömledékkeverés	17
2.4. Ömledékkeverés gyakorlati megvalósítása	18
2.4.1. Polimerek keveredésének mechanizmusa	18
2.4.2. Technológia helyes beállítása	19
2.4.3. Statikus keverők	20
2.4.4. Dinamikus keverők	24
2.5. Fröccsöntésszimuláció.....	27
2.5.1. Szimulációs számítások használatának indokoltsága	27
2.5.2. A szimulációs programok működése.....	28
2.5.3. A kitöltési fázis szimulációja	30
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések	32
3.1. Felhasznált alapanyagok	32
3.2. Alkalmazott berendezések	33
3.3. Vizsgálati módszerek	34
3.3.1. Mérőprogram kalibrálása.....	34
3.3.2. A színegyenetlenség mérése és a nyomásesés meghatározása	35
3.3.3. Mechanikai és hővezetési tulajdonságok mérése.....	37

4. Kísérleti/fejlesztési rész	39
4.1. Eljárás kifejlesztése a színegyenetlenség számszerűsítésére	39
4.1.1. Humán kiértékelés	39
4.1.2. Kiértékelés a képelemző szoftverrel	41
4.2. Statikus keverőn fellépő nyomáskeresés vizsgálata	46
4.3. Statikus keverő homogenizáló képességének minősítése	50
4.4. Keverők hatása a töltőanyagok eloszlottságára	51
4.4.1. Mechanikai tulajdonságok vizsgálata	52
4.4.2. Hővezetési tényező vizsgálata	55
5. ÖSSZEFOGLALÁS	57
5.1. Eredmények kiértékelése	57
5.2. Javaslatok, eredmények összefoglalása	58
6. Felhasznált források	59
7. Summary	62

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
Δa	zöld és vörös közti átmenetből adódó különbség	-
Δb	kék és sárga közti átmenetből adódó különbség	-
ΔE	színpontok euklédieszi távolsága	-
ΔL	fényességkülönbség	-
A	felület (surface)	m ²
CMD	korrigált hibaérték (corrected mean difference)	-
c_p	fajhő (specific heat)	J/K
d	átmérő (diameter)	mm
dp	nyomáskülönbség (pressure difference)	bar
g	nehézségi gyorsulás (gravitational constant)	m/s ²
GMD	teljes képet jellemző átlagos eltérés (global mean difference)	-
HMD	legnagyobb átlagos eltérés (highest mean difference)	-
k	ablakméret (window size)	pixel
MD	átlagos eltérés (mean difference)	-
Q	hőmennyiség (heat)	W
t	idő (time)	s
T	hőmérséklet (temperature)	K
T	hőmérséklet (temperature)	°C

Görög betűk

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

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
ABS	akrilnitril butadién sztírol (acrylonitrile butadiene styrene)
BN	bór-nitrid (borone nitride)
CAD	Számítógéppel segített tervezés (Computer Aided Designing)
CAE	Számítógéppel segített mérnöki munka (Computer Aided Engineering)
CAM	Számítógéppel segített gyártás (Computer Aided Manufacturing)
CNT	szén nanocső (carbon nanotubes)
CTM	(Cavity Transfer Mixer)
dpi	pont per hüvelyk (dot per inch)
DWCNT	duplafalú szén nanocső (double wall carbon nanotubes)
Lab	színtől független fényesség (luminance) zöld és vörös közti átmenet (green-red transition) sárga és kék közti átmenet (yellow-blue transition), színekoordináták
LED	világító dióda (Light Emitting Diode)
MFI	szabványos folyási mutatószám (melt flow index)
MWCNT	többsfalú szén nanocső (multi wall carbon nanotubes)
PA	poliamid (polyamide)
PAN	poliakrinitril (polyacrylnitril)
PC	polikarbonát (polycarbonate)
PE	polietilén (polyethylene)
PP	polipropilén (polypropylene)
PVC	poli(vinil-klorid)
RGB	vörös (red) zöld (green) kék (blue), színekoordináták
SWCNT	egyfalú szén nanocső (single wall carbon nanotubes)
UV	ultraviola (ultra violet)

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

A fröccsöntés a műanyagipar egyik legmeghatározóbb tömegtermelésre alkalmas gyártástechnológiája, amivel bonyolult 3D-s termékek előállítása is megvalósítható. Az alig több mint 100 éve létező eljárás az utóbbi években egyre nagyobb mértékű szerepet játszik a polimer termékek gyártásában, amit az is jól mutat, hogy ma már a világon feldolgozott műanyagok körülbelül egynegyedét fröccsöntéssel állítják elő. Magyarországon is hasonló a helyzet, a műanyag termékek körülbelül 30%-a így készül, amelyek aztán az ipar legkülönbözőbb területein kerülnek felhasználásra, mint például az autóipar, csomagolóipar, orvostechika, játékipar. Sok esetben a termékeknek magas minőségi előírásoknak kell megfelelnie nem csupán műszaki, de esztétikai, funkcionális, ergonómiai szempontból is [1-3].

Az esztétikai hibák közül első ránézésre a termék színében lévő inhomogenitások a legszembeötlőbbek, amelyek megjelenésének fő oka a színezőanyagok nem megfelelő eloszlata a polimer mátrixban. A polimerek színezésére használt anyagok lehetnek pigmenteket és festékek, amelyek feladata, hogy megváltoztassák az alapanyag optikai tulajdonságait. A színező- és egyéb töltőanyagok megfelelő eloszlására különböző eszközök és módszerek állnak rendelkezésünkre. A keveredést és ez által a termék homogenitását is befolyásolja maga a fröccsöntő gép, a technológiai paraméterek megválasztása, a keverőelemek, a csiga, valamint a szerszám geometriája, illetve ezen felül fontos az alap- és a töltőanyagok helyes megválasztása is [1, 2].

Ha a megfelelő alapanyagok, fröccsöntő gép és technológiai paraméterek megválasztásával sem sikerül megfelelő mértékű keveredést megvalósítani, akkor a termék homogenitása tovább javítható keverőelemek alkalmazásával, amelyek két nagy típusba sorolhatók, a dinamikus és a statikus keverők csoportjába. Mindkét típusnak megvannak a maga előnyei és hátrányai. A statikus keverők használata mellett szól, hogy az aggregátra, a csiga elé szerelve nem csökkentik annak hasznos hosszát, így nem rontják a plasztikálási teljesítményt. A dinamikus keverők nagy előnye, hogy jóval nagyobb nyírásnak teszik ki az alapanyagot, ami a keveredés alap feltétele. A keverők hátránya azonban, hogy az ömledék szerszámba juttatásához szükséges nyomásigényt növelik. A nyomásigény növekedése nagyban függ a keverő kialakításától, annak méretétől, az alkalmazott keverőelemek számától, valamint a keverőelemek geometriájától. Ezen felül számos más, statikus keverő kialakításához nem köthető tényezőtől is függ, mint például az ömledék folyóképessége [1, 2].

A fröccsöntött termékek minőségét jelentősen befolyásolja a színükben lévő inhomogenitások mértéke. Ezek minősítése többnyire a dolgozók segítségével történik, akik szubjektív módon képesek az adott egyenetlenségeket értékelni. A hibára adott értékelés számos emberi tényezőtől függ, valamint az is megfigyelhető,

hogy sokszor az emberek akár ugyanarra a hibára is más értékelést adnak egy kis idő elteltével. A mérési módszer bizonytalansága tehát indokolja egy olyan rendszer kifejlesztését, ami objektív módon képes a színbeli egyenetlenségeket osztályozni.

Dolgozatomban célul tűztem 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 Polimertechnika Tanszéken kifejlesztett színegyenetlenség mérő programot használtam. A statikus keverők keverési hatékonyságának vizsgálata előtt elvégeztem a mérőrendszer kalibrálását. A kalibrálás során a mérőrendszert szakképzett kiértékelő személyzet által meghatározott hibaértékek figyelembe vételével kalibráltam úgy, hogy a mérőrendszerrel való kiértékelés eredményei a lehető legjobban korreláljanak a humán kiértékelés hibaértékeivel. A statikus keverő minősítése után méréseket végeztem annak érdekében, hogy meghatározzam az adalékanyagok eloszlottságának a mechanikai és a hővezetési tulajdonságokra gyakorolt hatását. A mechanikai vizsgálatokat különböző mértékben töltött anyagokból gyártott próbatesteken végeztem el. Emellett mérések segítségével meghatároztam a töltőanyagok mennyiségének és eloszlottságának hatását a hővezetési paraméterekre.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben a diplomaterv megértését segítő elméleti alapok kerülnek áttekintésre. Szó lesz a polimerekhez kevert adalék- és színezőanyagok típusairól, azok elosztatásának módszereiről és eszközeiről, szimulációs lehetőségeiről.

2.1. Töltő-, erősítő- és adalékanyagok

Az adalékanyagok legnagyobb felhasználója a műanyagipar, azonban felhasználásuk nem korlátozódik kizárólag a polimerek előállítására, számos más helyen is alkalmazzák őket, mint például a kozmetikai termékek előállítása, felületkezelés és festés, gyógyszeripar [4].

1. táblázat Adalékanyagok típusai [4]

Adalékok	Adalék feladata
Erősítőanyagok	A mechanikai tulajdonságok javítása
Töltőanyagok	Termék árának csökkentése, mechanikai tulajdonságok módosítása (ütésállóság)
Színezékek	színezés
Hővezetést javító adalékok	Polimerek hővezetési tényezőjének javítása
UV stabilizátorok	UV fény hatására történő degradáció mértékének csökkentése
Égésgátlók	Égési tulajdonságok módosítása
Stabilizátorok, csúsztatók,	Feldolgozási tulajdonságok javítása
Antisztatizálók	Az elektromos feltöltődés megakadályozása
Gócképzők	kristályosodás elősegítése

Ezek közül a diplomamunka témájához a hővezetést javító adalékok és a színezékek erősen kapcsolódnak. Ezek a 2.1.1-es és a 2.2.3-as fejezetben kerülnek bemutatásra. A többi adalékanyag elosztatása ugyanakkora jelentőséggel bír, viszont ezek homogenitását a diplomaterv keretei közt nem vizsgálom.

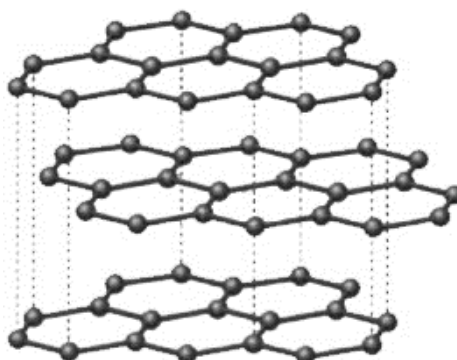
2.1.1. Gyakori töltő- és erősítőanyagok a hővezetés javítására

A töltőanyagok és erősítők javítják a polimerek mérettartását és mechanikai tulajdonságait, mint például a merevséget, szívósságot és a terhelhetőséget. Alkalmazásuk gyakran csak költségcsökkentés céljából történik. A leggyakoribb

töltőanyagok szervesetlen ásványi porok, amelyek közül a legelterjedtebbek a kalcium-karbonát, szilikátok és az agyag. Az erősítőanyagok általában szálfarmában kerülnek a polimer szerkezetekbe, ezeket kompozitoknak hívjuk. Napjainkban a szálfarm mellett a nanoerősítőanyagok is egyre nagyobb szerepet kapnak. A nanotöltőanyagok egy mérete legalább a nano tartományba esik, eloszlásuk nehézkes, hajlamosak az agglomerálódásra. Ennek egyik oka, hogy a szervesetlen erősítők és a szerves polimerek szerkezete nagyon eltérőek. A köztük lévő kapcsolat javítása érdekében a polimerekhez csatolószer (felületkezelő szereket) adalékolnak annak érdekében, hogy a mátrix és az erősítőanyag közti adhéziót javítsák [4-6].

Grafit, grafén

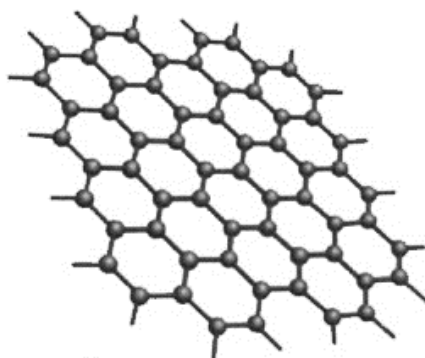
A grafit a legjobb hővezetést javító adalékként ismert, mivel nagyon jó hő- és elektromos vezetési tulajdonságokkal rendelkezik és emellett olcsó, könnyű és jól elosztható a polimer mátrixban. A grafit a szén egyik allotrop kristályos módosulata, amely megtalálható a természetben, illetve mesterségesen is előállítható. Hővezetési tényezője körülbelül a 100-400 W/mK tartományba esik [7]. Lemezes szerkezetű (1. ábra). Minden szénatomot három szomszédos szénatom vesz körül, viszont a szénnek négy vegyérték elektronja van, ezért a szénatomok közt a három kötésből egy kettős kötés lesz. A grafitlemezek egymáson könnyen el tudnak csúszni, mivel a grafit síkjai közt nincsenek elsődleges kötések. Ez a síkok közti távolságban is meglátszik. A grafit síkjainak távolsága körülbelül 2,5-szer akkora, mint a síkban szomszédos szénatomok távolsága. A grafit az egyes rétegekben körülbelül 400 W/mK hővezetési tényezővel rendelkezik (polikristályos grafit), azonban a síkokra merőlegesen csupán 2 W/mK a hővezetési tényezője. A grafit jó vezető képességét a síkban található kettős kötés és a síkbeli rendezettsége okozza. A grafit a jó vezetési tulajdonságai mellett az egyik legjobb feldolgozást segítő adalék. A grafit síkbeli szerkezete nagyon stabil, a szénatomok közelebb helyezkednek el egymáshoz, mint a gyémánt kristályrácsában. Mivel a grafit síkjában a szénatomok közti kötés energia nagyon magas, gyakran használják mechanikai tulajdonságok javítására is [8, 9].



1. ábra A grafit kristályrács szerkezete (hexagonális) [10]

A grafit kristályrácsában a rétegek kétféle elrendeződésűek lehetnek. Az egyik a hexagonális rácsszerkezet, a másik pedig a romboéderes. A hexagonális kristályrácsú grafit esetében minden második réteg fedi egymást, -ABABABABA- szerkezet alakul ki. Romboéderes szerkezet esetén a minden harmadik réteg fedi egymást, -ABCABCABCA- szerkezet alakul ki. A hexagonális kristályrácsú grafit termodinamikailag stabil és minden szintetikus anyagban megtalálható, míg a romboéderes instabil és tiszta formájában nem fordul elő, csak a hexagonális szerkezettel együtt [9].

A grafit különböző mechanikai vagy kémiai eljárással tovább bontható, így grafitlemezek szétválasztásával grafén állítható elő, ami egy atomnyi vastagságú grafitlemez. Ezek a grafitlemezek azonban nagyon könnyen aggregátumokba tömörülnek, vagy Van der Waals kötések kialakításával újra grafitformába rendeződnek. A későbbi feldolgozás szempontjából fontos, hogy a lemezek aggregátumokba tömörülését elkerüljük. Eddigi mérések szerint a grafén hővezetési tényezője akár az 5000 W/mK-t is meghaladhatja (egyetlen grafénlemez) [11].



2. ábra A grafén szerkezete [10]

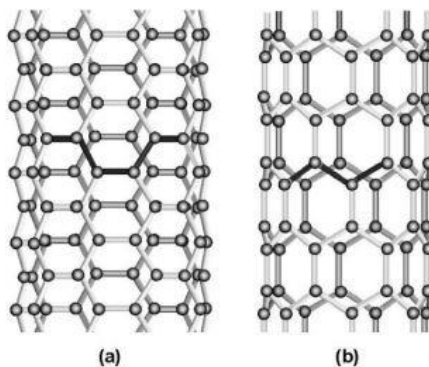
A szénszál

A szénszál szerkezete sokban eltér a grafit szerkezetétől. A szénszál tulajdonképpen polikristályos grafit, ami a grafitkristályok agglomerálódásából jön létre. Ezek az aggregátumok sokféle méretben vannak jelen a szénszálakban. A szénszálak használatának elterjedését segítette, hogy igen jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, alacsony a sűrűségük és kereskedelmi forgalomban elfogadható áron megvásárolható. Az oxidációval szembeni ellenállása gyenge. Ha összehasonlítjuk az üvegszállal, akkor elmondható, hogy jóval nagyobb szakítószilárdsággal (üveg: kb. 4,6 GPa, szénszál: kb. 5,5 GPa) és húzórugalmassági modulussal (üveg: kb. 86 GPa, szénszál: kb. 330 GPa) rendelkezik és emellett még a sűrűsége (üveg: kb. 2,5 g/cm³, szénszál: kb. 1,7 g/cm³) is kisebb. A szénszálak gyártása leggyakrabban poliakrilnitril (PAN) alapanyagból történik. Az iparban ez a legelterjedtebb és a mechanikai tulajdonságai is jobbak, mint a más eljárással készült

szén-szálaknak, arról nem is beszélve, hogy az előállításuk is gazdaságosabb. Hővezetés szempontjából a szurok és kátrány alapú szén-szálaknak vannak a legjobb tulajdonságai [9].

Szén nanocső

A szén nanocsövek szerkezete a grafénből származtatható, amit elképzelhetünk úgy, mint feltekert grafén réteget. Mivel a grafén kristályrácsa hexagonális, így a nanocsőé is az lesz, tehát a nanocső minden szénatomjához három másik szénatom kapcsolódik. A szén nanocsövek szerkezetüket tekintve sokféle szempontból különbözhetnek egymástól, például a csövek hosszában, átmérőjében, a rétegek csavartságában, rétegek számában. A rétegek száma szerint megkülönböztethetünk egyfalú (SWCNT), duplafalú (DWCNT) és többfalú (MWCNT) szén nanocsöveket, amik átmérője jelentősen különbözik. Az egyfalú nanocsövek átmérője az 1 nm-es tartományba esik, míg a többfalú nanocsövéké akár a 100 nm-t is elérheti. A vezetési tulajdonságait nagymértékben befolyásolja a feltekercselési irány, mivel a nanocső molekuláinak különböző elrendeződése különböző lesz a hossz menti irányban (3. ábra). A feltekercselési szög határozza meg a nanocső csavartságát. Minél jobban sérül a feltekercselés során a molekuláris rendszer szabályossága, annál rosszabb vezetési tulajdonsággal fog rendelkezni a nanocső [11-13].



3. ábra A nanocső molekuláris elrendeződése a feltekercselési irányfüggvényében [13]

a, karosszék nanocső b, cikk-cakk nanocső

Bór-nitrid

A bór-nitrid egy modern, mesterséges anyag, amelynek a kristályrácsa rendezett és tulajdonságaiban a grafithoz hasonló. A bór-nitridnek többféle allotrop módosulata létezik, amelyek más-más tulajdonságokkal rendelkeznek. A hexagonális kristályrácsú bór-nitrid (fehér grafít) például jól alkalmazható feldolgozást segítő adalékként. A köbös bór-nitrid a második legkeményebb anyag a gyémánt után, ezért fröccsöntésnél nem igazán használható adalékként erős koptató hatása miatt. A

bór-nitrid módosulatainak kristályrácsa jól párhuzamba állítható a szén allotróp módosulatainak kristályrácsával. A hexagonális és romboéderes bór-nitrid ugyanolyan típusú kristályráccsal rendelkezik, mint a hasonló típusú grafitok, illetve a köbös bór-nitrid kristályrácsa a gyémántéhoz hasonló. A szilárdsági tulajdonságairól ugyanaz mondható el, mint a szén esetében. A kis sűrűségű módosulatok kis keménységi értékekkel rendelkeznek. A bór-nitrid jól használható hővezető kompozitok adalékolására, mivel rendkívül jó hővezetési tulajdonságokkal bír, emellett pedig elektromosan nem vezető [14, 15].

Talkum

A talkum az összes ásvány közül az egyik legpuhább, amely magnézium-dihidroxid és szilícium-dioxid lemezekből épül fel. A rétegek közt gyenge Van der Waal féle kötések vannak. A talkumban gyakran más összetevők is megtalálhatóak, mint például a magnézium, vagy vas, amik a szilikát rétegekhez kapcsolódnak. A polimer iparban a tiszta talkumot alkalmazzák általában. A polimerhez képesti jó hővezetési tulajdonságai miatt gyakran használják polimer kompozitok töltésére olyan alkatrészek gyártásánál, ahol a hővezetés követelmény. Leggyakrabban PP, PE és PA alapanyaggal társítják [16].

2.1.2. Egyéb gyakran használt 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.

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, 6].

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, mivel a fém ionok gyorsan elvezetik az energiát, mielőtt a polimer láncok tördelődni kezdenének [4, 6].

Égésgátlás

Az égésgátló adalékok nehezítik a polimerek gyulladását és kontrollálják a már meggyulladt alapanyag égését, emellett 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, elszenesednek és így a maradék éghető részt elzárják az oxigéntől [4, 6].

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. 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 csúsztatószerkezetek 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 konnektor, háztartási termék és a vezetékek bevonata is műanyagból készül. Fontos szempont, hogy ezek használata biztonságos legyen. A számítástechnikai alkalmazásokban el kell kerülni a véletlen feltöltődést és szikrakisüléseket. Sokféle adalék áll a rendelkezésre, melyekkel a polimer vezetőképessége beállítható (pl.: szénszál, fémek, fémszálak), az antisztatizálók pedig megakadályozzák a feltöltődést. Az 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. A polimerek színezése

A műanyag termékek szinte egytől egyig tartalmaznak színezőanyagokat is az adalékanyagok mellett. 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, gócképzők, 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.

2.2.1. Színek, színek azonosítása, színterek

A látható fény az energia egy sajátos formája, ami az elektromágneses sugárzások családjába tartozik. A látható fény mellett ide tartozik a röntgen-, az infravörös, az ultraibolya sugárzás, valamint a rádióhullámok is. A látható fény jól jellemezhető alkotóinak hullámhosszával, ami a 380-750 nm-es tartományba esik. A tiszta színek hullámhossz szerint növekvő sorrendben a következők [17]:

- ibolya,
- kék,
- zöld,
- sárga,
- narancs,
- vörös.

A színek érzékeléséhez három dolog szükséges, egy fényforrás, egy tárgy, amit a fényforrás megvilágít és valami, ami érzékeli a tárgyról visszaverődő sugárzást. A legtöbb fényforrás, amit ismerünk, mint például a nap, az izzólámpák izzószála, vagy az izzó fémek közel fehér fényt bocsátanak ki. A fehér fény felbontható alkotóelemeire (Newton 1730) egy prizma segítségével. Bármely fényforrás által generált fény jellemezhető a spektrális energiaszórásával a hullámhossz függvényében. A fényforrások egy fontos csoportja a fekete testek, amelyek spektrális eloszlása csak a hőmérsékletüktől függ. Melegítés hatására ezek először matt piros színt vesznek fel, mint az izzó fémek, majd a hőmérséklet növelésével egyre fényesebbek és fehérebbek lesznek, mint a villanykörteben található izzószála. Egy fényforrás spektrumát jellemezhetjük a színhőmérséklettel is. A színhőmérséklet azt a spektrális eloszlású fényt határozza meg, amelyet a fekete test adott hőmérsékleten bocsát ki magából. Ha például egy fényforrás 6500 K színhőmérsékletű, akkor a spektrális eloszlása megfelel a fekete test által, 6500 K hőmérsékleten kibocsátott fény spektrális eloszlásával [17].

Ha a fény útjába valamilyen tárgyat helyezünk, akkor a beeső fénysugár visszaverődhet annak felületéről, szétszóródhat a felületről, elnyelődhet az anyagban, vagy keresztülhaladhat rajta irányváltoztatással vagy a nélkül. Például egy átlátszó termék esetén a beérkező fény szinte teljes egészében keresztülhalad az anyagon és csak minimális része verődik vissza a termék felületéről vagy nyelődik el benne. Az anyagok törésmutatója azt mutatja meg, hogy a közeghatáron mennyit veszít a beérkező fény a sebességéből, ahhoz képest mintha levegőben haladna. A fény sebességváltoztatásának hatására a beérkező fénysugár egy része elhajlik, vagy visszaverődik a közeghatárról. Az elhajlás szöge függ a beérkező fény hullámhosszától, a beesés szögétől is, ami lehetővé teszi, hogy egy prizma segítségével a napfény alkotóelemeire bonthassuk [17].

A termékekben elnyelt nagy mennyiségű fény érzékelhető, hiszen az elnyelődő fény felmelegíti a testet, amiben elnyelődött. Ha a test a fény egy részét elnyeli, az színesnek látszik, de még mindig átlátszó. Az a test, amely minden ráeső fényforrást elnyel, feketének látszik. Az elnyelődés mellett, a beeső fénysugár a közegben szét is szóródhat és különböző irányokban halad tovább. A napból érkező fény szétszóródása a légkör molekuláin az oka annak, hogy színesnek látjuk az égboltot és a felhőket. Ha a szétszóródás olyan intenzív, hogy a fény nem hatol át az anyagon, akkor nem áttetsző, ha pedig a fény keresztülhatol rajta akkor áttetsző. A tárgyak színe az elnyelődés és a szétszóródás függvénye. Ha a tárgy nem nyeli el a fényt egyik hullámhosszon sem és a szétszóródás a fény minden hullámhosszú alkotójánál azonos, akkor a tárgy fehérnek látszik, egyébként színesnek. A szóródás mértéke függ az anyagban található részecskék méretétől és törésmutatójától. Annál nagyobb a szóródás, minél jobban eltér egymástól a részecskék és az őket magában foglaló anyag törésmutatója. A szóródás a részecskék méretének növekedésével együtt nő egészen addig, amíg a részecske mérete a fénysugár hullámhosszának nagyságrendjébe esik, a feletti részecskeméret esetén pedig csökkenő jelleget mutat. A pigmentek például nagyon jó színezékek, amiket gyakran használnak polimerek színezésére, mivel a törésmutatójuk jelentősen eltér a színezendő anyagétól [17].

A tárgyak megjelenése a felületi minőségüktől függ. Beszélhetünk fémesen csillogó és matt felületekről. A durva felületi minőségű tárgyak matt színűek, míg a jó felületi érdességűek fényesen csillogóak [17].

A tárgyak anyagát csakúgy, mint a fényforrásokat jellemezhetjük. Erre a célra a spektrális áteresztés és szóródás eloszlásfüggvényeit használják, amelyek azt mutatják meg, hogy a tárgyról a fény adott hullámhosszú összetevői milyen mértékben verődnek vissza vagy haladnak keresztül a tárgy anyagán [17].

Színek azonosítása, színterek

A tárgyak színének jellemzése megoldható 3 szám segítségével, ami a tárgy visszaverődési és áteresztési görbéjéből származtatható. Minél komplexebb módon

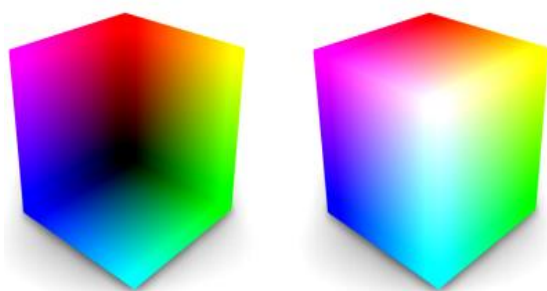
származtatjuk ezt a három jellemzőt, annál jobban le tudjuk írni, hogy mit lát a szemünk. A színek leírására használt színterek közül az RGB a legegyszerűbb és legelterjedtebb.

Az **RGB** színtér (4/a. ábra) egy olyan színek összekeveréséből adódó színmodell, ami a vörös, zöld és kék színekből állítja elő a többi színt. A színek pontos definiálása miatt az alapszíneket, amelyeket összekeverünk, egyértelműen meg kell határozni. Az RGB színmodell alapjául választott alapszínek a következők:

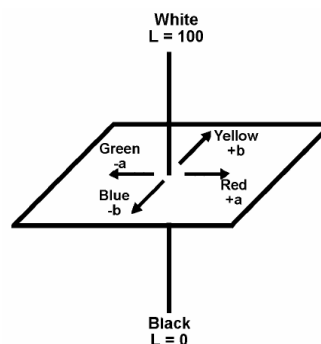
- vörös, 700 nm hullámhosszú, monochromatikus fény, 0,17697 lumen fényerősséggel
- zöld, 546,1 nm hullámhosszú, monochromatikus fény, 0,81240 lumen fényerősséggel
- kék, 435,8 nm hullámhosszú, monochromatikus fény, 0,01063 lumen fényerősséggel

Az RGB színtér alapszíneit összekeverve 1 lumen fényerejű fehér fényt kapunk. Az RGB színtér hátránya, hogy nem írható le vele az összes szín és az emberi színérzékeléssel nem jól korreláltható [18].

A **CIE rendszer** (Comission International de l'Éclairage) meghatározása szerint a fényforrásokat és a megfigyelőt szabványosítja. A szabványosított fényforrások a napfény, LED fényforrások, izzószálak stb. reprezentálására hivatottak, spektrális eloszlásuk a látható tartományban közel azonos a fényforrásával, amit meghatároznak. Manapság a D₆₅ elnevezésű fényforrást használják széles körben, ami a napfény spektrális eloszlását reprezentálja. A megfigyelő szabványosítása azonban nem volt ilyen egyszerű. Kísérletek és bonyolult matematikai számítások eredményeként hozták létre az L*a*b* színteret (4/b. ábra), amely a látható tartomány színeinek egyértelmű leírására alkalmas. A színeket három egymástól független mennyiség segítségével tudjuk leírni, amik a világosság (L), a vörös és zöld (a), illetve a kék és sárga (b) szín közti átmenetet jellemző mennyiségek. A pozitív (a) értékek a piros árnyalatokat azonosítják, a negatívak pedig a zöldeket. A (b) esetén a pozitív értékek a sárga, a negatívak pedig a kék színeknek felelnek meg. Az (L) értéke 0-100 tartományon belül változhat. A fekete színhez a 0 (L) érték tartozik, a fehérhez pedig a 100, ha (a) és (b) értéke 0 [17].



a,



b,

4. ábra a, RGB színtér megjelenítése; b, Lab színtér értelmezése [18, 19]

Színek közti különbségek értelmezése a színterekben

A színek közti különbségeket a különböző színterekben úgy értelmezhetjük, mint a színpontokhoz tartozó koordináták Euklédieszi távolsága. A színek közti különbségekből számol hibaértékeket az általunk fejlesztett képelemző szoftver is az 1. összefüggés szerint.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad , \quad (1)$$

ahol ΔE a színpontok térbeli távolsága, ΔL a fényességkülönbség, Δa a zöld és vörös közti átmenetből adódó különbség, Δb pedig a sárga és kék közti átmenetből adódó különbség.

2.2.2. Színezékek és adalékok típusai

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 elosztatása 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 [20].

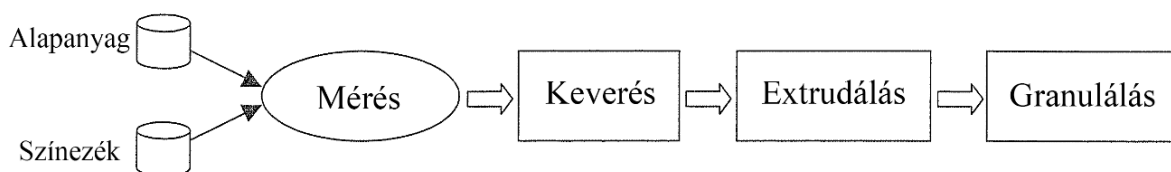
Mesterkeverékek

A mesterkeverékes színezés a legelterjedtebb formája a polimerek színezésére használt adalékoknak. A mesterkeverékek olyan granulátum formájú polimer blendek, amik nagy koncentrációban tartalmazzak 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 tartalmazzak. 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 [20].



5. ábra Mesterkeverékes színezés [21]

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 eloszlása 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 [20].

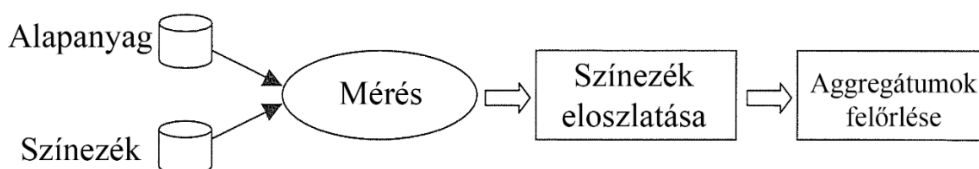


6. ábra A mesterkeverékek gyártásának lépései [20]

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

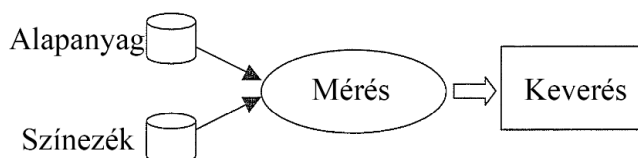
tartalmazza. A folyékony színezőanyagok gyártása igen egyszerű. A komponensek kimérése után az alkotókat összekeverik, majd összezúzzák az agglomerátumokat. A folyékony színezékek alkalmazásának előnyei, hogy könnyen eloszthatók a színezni kívánt alapanyagban és az adagolás pontos. Hátránya, hogy nem érhető el olyan magas színezőanyag tartalom, mint a poros vagy mesterkeverékes színezésnél és a gyártás közbeni színváltás költségei magasak [20].



7. ábra A folyékony színezőanyagok gyártásának lépései [20]

Por formájú színezőanyagok

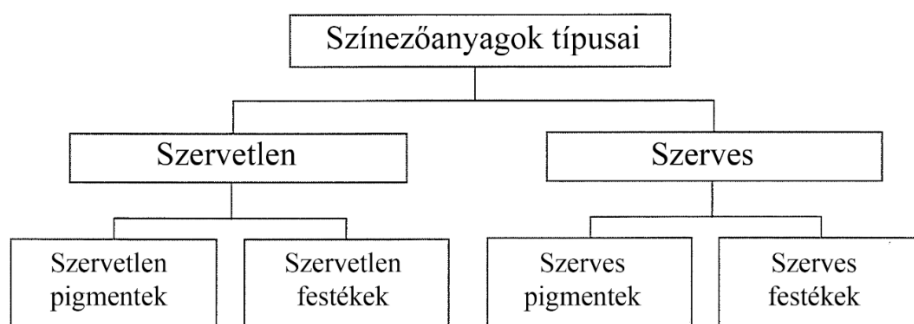
A termékek színezésének legegyszerűbb módja - por formájú színezőanyag alkalmazása esetén - ha tiszta színezőanyagot keverünk a polimerhez. A por formájú színezékek elosztatása adalékokat igényel, amelyek segítik a megfelelő elosztatást. Az adalékok és a színezőanyag elosztatására több fajta keverő létezik, 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 extrúziónál használatos. Fröccsöntésnél a csigával nem tudunk elegendő nyírást bevinni a rendszerbe, így a por formájú színezéket nem tudjuk megfelelően elosztatni. A por alapú színezés előnye, hogy magas koncentrációban adagolható a színezőanyag a polimerhez és gazdaságos, mivel az előállítási költsége igen alacsony. Legnagyobb hátránya, hogy elosztatása a polimer mátrixban igen körülményes, adalékanyagok használata elengedhetetlen és a gyártás közben történő színváltás is bonyolult [20].



8. ábra Por formájú színezőanyagok gyártásának lépései [20]

2.2.3. Színezékek csoportosítása összetételük szerint

A színezékeknek hívjuk az olyan vegyületeket, amelyek képesek megváltoztatni a polimerek optikai tulajdonságait. Kémiaileg két típusba sorolhatjuk őket, a szerves és a szervesetlen 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 (9. ábra). Polimerek színezésére mindegyik típus használható, a szervesetlen festékeket kivéve, mivel nincs olyan polimerek színezésére használt festék, ami szervesetlen. 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 eloszlathatóak 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 [20].



9. ábra Színezőanyagok típusai [20]

2.3. Aggregátumok felbontása

A töltött rendszerek gyártásánál kulcsfontosságú kérdés az adalékanyagok eloszlása. A szén alapú töltőanyagok esetén az adalék megfelelő, egyenletes elkeverése a polimer mátrixban komoly kihívást jelent. Az aggregátumok felbontására és a részecskék homogén eloszlására több eljárást is kifejlesztettek. Ezek közül a legfontosabbak az in-situ polimerizáció, az oldatos keverés és az ömledékkeveréses eljárások.

2.3.1. *In situ* polimerizáció

In situ polimerizációs keverés esetén a töltőanyagokat a monomer alapanyagban oszlatjuk el, majd ezt követően történik a polimerizáció. A töltőanyagok felületkezelésével a keveredés javítható, illetve a felületkezelés lehetővé teszi a megfelelő kapcsolódás kialakulását töltőanyag és mátrix között. Az eljárás előnye, hogy a polimerizáció során elsődleges kötések kialakulására is lehetőség van a mátrix és a töltőanyag közt. Az eljárást használták már MWCNT-vel töltött polipropilén mátrixú kompozit létrehozására is [14].

2.3.2. *Oldatos keverés*

Az oldatos keverés a legelterjedtebb módszer a töltőanyagok elosztatására CNT alapú polimer kompozitok esetén. Az oldatos keverés 3 fő lépésből tevődik össze, amelyek sorrendben a következők:

- CNT elosztatása az oldószerben,
- az oldat összekeverése a polimerrel,
- végül a kompozit visszanyerése ülepítéssel, vagy filmréteg képzésével.

Az oldatos keverés előnye, hogy a grafén lemezek és a módosított grafén könnyen elosztható az oldószerben, ami lehet például víz, aceton, kloroform, stb. Az eljárást általában epoxy alapú kompozitok esetén alkalmazzák, de az oldószer eltávolítása egy kritikus része a folyamatnak, mivel rendkívül sok oldószermolekula kell ahhoz, hogy a töltőanyag részecskéi elváljanak egymástól. Az eljárás használható PP alapú kompozit esetén is [14, 22].

2.3.3. *Ömledékkeverés*

Az ömledékkeveréses eljárásnál nincs szükség oldószerre a töltőanyagok elosztatásához, hiszen a keveredés a megömlesztett polimerben mechanikus keverők segítségével jön létre. Ez az eljárás csak a termoplasztikus polimerek esetén alkalmazható, mivel a térhálós polimereknél csak termikus bomlásról beszélhetünk, olvadásról nem. A legalapvetőbb gyártástechnológiák, amelyeknél alkalmazható az ömledékkeveréses eljárás a fröccsöntés és az extrúzió. Az eljárás nem olyan hatékony, mint az oldószeres keverés, jóval kisebb koncentrációjú töltés valósítható meg. Ennek oka, hogy a töltőanyag mennyiségének növelésével a polimerömledék viszkozitása megnő [14]. Az ömledékkeverés lehetőségeiről a 2.4-es fejezetben részletesebben foglalkozom.

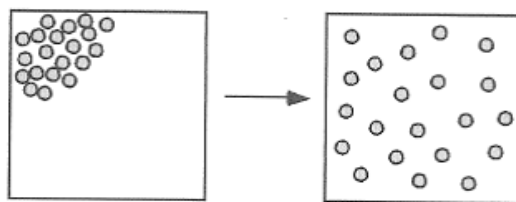
2.4. Ömledékkeverés gyakorlati megvalósítása

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 fúvókába 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 a keverő mellett [23].

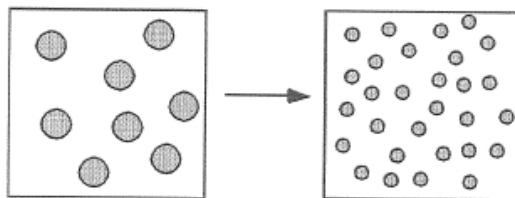
2.4.1. Polimerek keveredésének mechanizmusa

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 [24].

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 (10. ábra) és diszperzív keveredésről, ha a molekulák mérete csökken a folyamat során (11. ábra). Tipikusan diszperzív keveredés a polimerben elosztatott pigmentekből álló agglomerátumok felőrlése. Disztributív keveredésre példa a mesterkeverék elosztatása a polimer granulátumban [24].



10. ábra Disztributív keveredés [24]

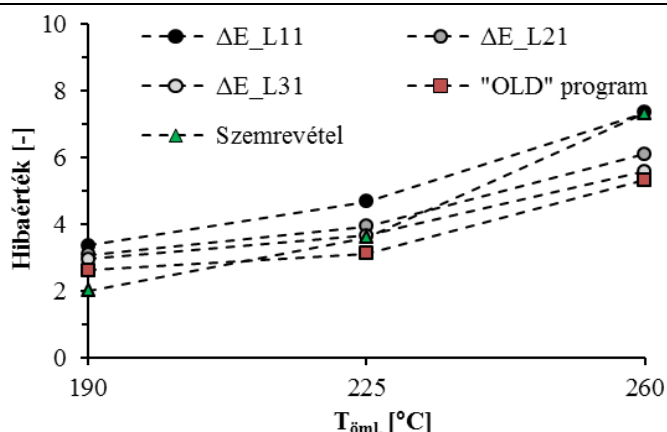


11. ábra Diszperzív keveredés [24]

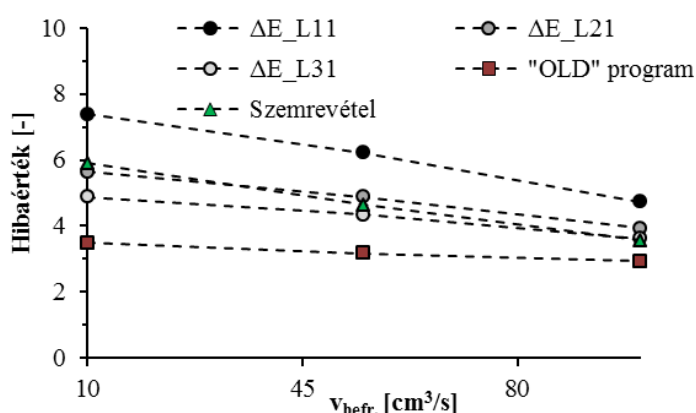
Keveredés közben akkor javulhat a keverék homogenitása, ha az alkotók részecskéi közt relatív mozgás van. Ez megvalósulhat diffúzió révén, ami a kis molekulatömegű anyagokra jellemző, polimerek esetén elhanyagolhatóan kicsi, valamint turbulens áramlás formájában, ami a kis viszkozitású anyagoknál jön 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 fúvókájában, vagy az elosztócsatornában. Az aggregátban kialakuló áramlásnál az áramlás hajtóereje a forgó csiga és a nyomáskülönbség [24].

2.4.2. Technológia helyes beállítása

A termék színegyenletességét a legolcsóbb módon a fröccsöntő gép paramétereinek helyes megválasztásával javíthatjuk. Szakdolgozatomban már foglalkoztam ezzel a témával, ebben a fejezetben csak röviden összefoglalom a fontosabb eredményeket. 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 befroccsöntési sebesség és tartózkodási idő hatását elemeztem. Ezek közül az ömledék hőmérséklete befolyásolja legjobban a keveredést. A hőmérséklet növekedésével romlik a termékek színegyenletessége (12. ábra). Ez azzal magyarázható, hogy a polimer hőmérsékletének növekedésével csökken annak viszkozitása, így kevesebb nyírást szenved el az anyag a befroccsöntés során. A befroccsöntési sebesség növelésével kis mértékben javul a színegyenletesség (13. ábra). A tartózkodási időnek nincs kimutatható hatása a keveredésre.



12. ábra A befroccsöntési hőmérséklet hatása a termékek homogenitására



13. ábra A befroccsöntés sebességének hatása a termékek homogenitására

2.4.3. Statikus keverők

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 irányváltásokra 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 plasztifikálási 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 [25].

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 [25].

SMN típusú keverő

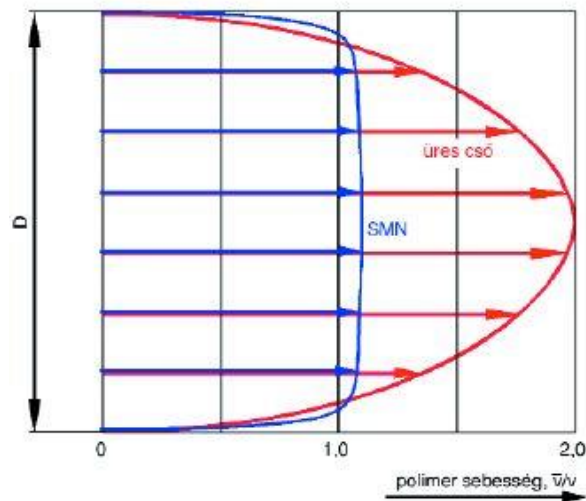
A Stamixco által kifejlesztett SMN statikus keverő (14. ábra) rendszerekben az egymást követő elemek 90° -ban el vannak fordítva egymáshoz képest. A keverőelemek zég-zugos kialakítású belső közfalai a laminárisan áramló polimer ömledéket szétválasztják, majd újra egyesítik. A keverőelemeken áthaladva az ömledék újra kör keresztmetszetű csatornában áramolhat tovább. A keverőelemek hálójá úgy van kialakítva, hogy a háló lapjai ne legyenek merőlegesek a folyási irányra. A keverőháló a polimer ömledéket ékszerűen osztja meg. A keverőelemek hossza rövid, csupán 10-20 mm [23].



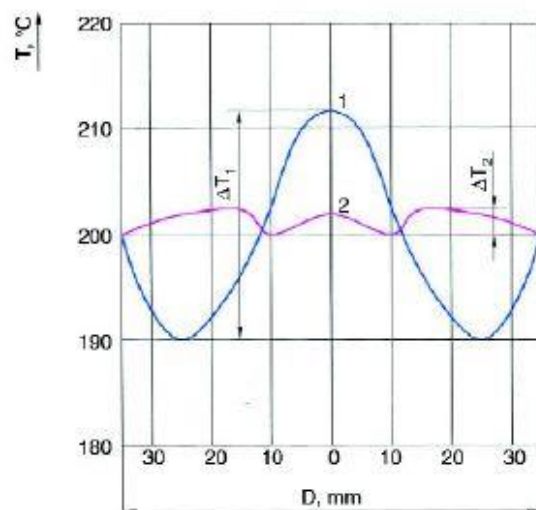
14. ábra StaMixCo SMN statikus keverő [23]

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 keverődűz niben 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 [23].

Schneider Gottlieb és Ungvári György 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 15. és 16. ábra mutatja. A hőmérsékletemelkedés a keverőelemeken 5°C 100 bar nyomásesésenként [23].



15. ábra Statikus keverő után és üres csőben kialakuló sebességprofil [23]



16. ábra Hőmérsékleteloszlás a statikus keverő után és üres csőben [23]

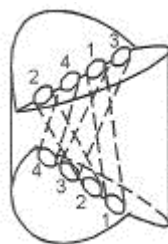
SMN keverő beépítésével csökkenthető a gyártási költség, mivel kevesebb színező anyaggal érhetjük el a kívánt szint. Minél egyenletesebben el tudjuk oszlatni a színezőanyagot a polimer ömledékben, annál jobb színlefedettséget érhetünk el. Reciklált anyag felhasználása esetén magasabb arányú töltés is elfogadható, ha a reciklált anyag egyenletesen el van oszlatva az alapanyagban [23].

SMX típusú keverő

Az SMX-típusú keverők viszkózus folyadékokhoz kifejlesztett statikus keverők, amelyeknél a nyomáscsökkenés mértéke csekély. A Sulzer cég ennek a keverőtípusnak a kifejlesztője, a piacra kerülés szinte azonnal után elterjedt és a polimerfeldolgozó iparban meghatározó fontosságúvá vált. 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 szétválk, majd mikor a két elem közti kamrába lép be, akkor újra egyesül.



17. ábra ISG típusú keverő geometriája [24]

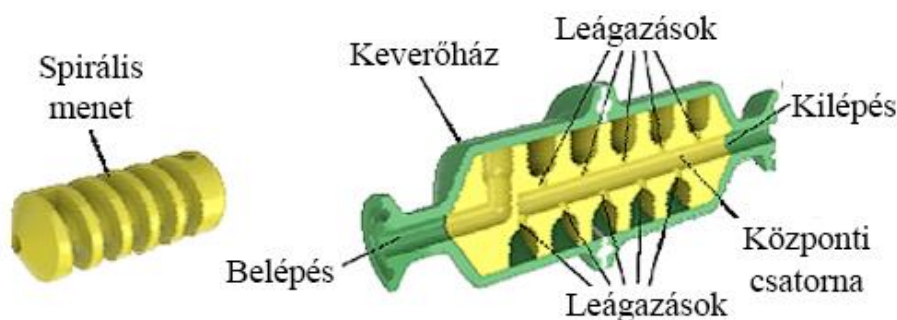
Két komponens bevezetésekor (kör keresztmetszetű csatornában, egymás mellett a két komponens) az első elemen való áthaladás után a két rétegből már nyolc lesz, és ez elemenként négyszereződik. Tíz elemmel már kétmillió réteg is elérhető. Ezt a típusú keverő rendszert nagy viszkozitású folyadékok keverésére 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 egyenatlenségeket 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 [26].

A TDM-típusú keverők mechanizmusa az időkésleltetésen alapul, a felépítését a 18. 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 [26].



18. ábra TDM típusú keverő geometriája [26]

Ez a keverőtípus kis viszkozitású folyadékok keverésére alkalmas, módosított geometriával talán alkalmazható lenne a nagyobb viszkozitású polimerömledékek keverésére is.

2.4.4. Dinamikus keverők

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.

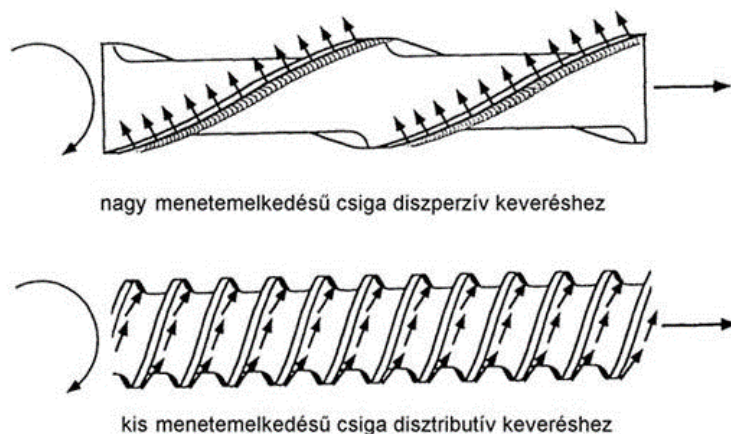
A csiga keverő hatása

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 [27].

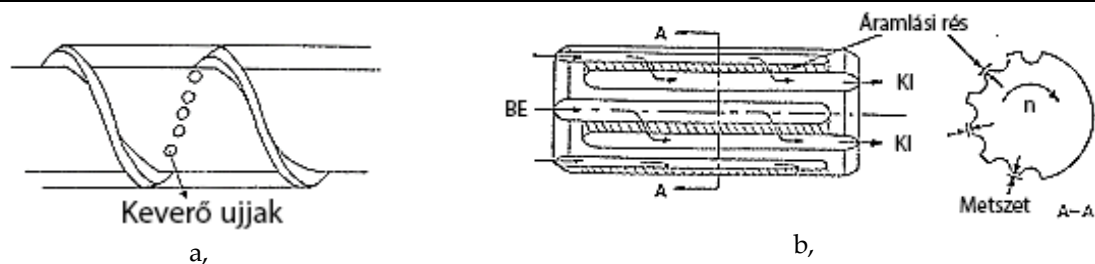
A behúzó zónában még nem történik jelentős keveredés. A kompressziós zónában a csiga menetmélysége csökkenni kezd, a polimer granulátumok egyre jobban hozzászorulnak a henger falához. A súrlódás és a hengerből átadott hő hatására megolvadnak. A csigacsatornában ömledékfilm képződik, ami a csatorna külső részén áramlik és egyre nagyobb nyíróerőt és nyomást gyakorol a még szilárd részecskékre. 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 [27, 28].

A keveredés típusát a csiga menetemelkedésének a kialakítása jelentősen befolyásolja. Nagy menetemelkedésű csiga diszperzív keverést, a kis menetemelkedésű csiga disztributív keveredést eredményez [27].



19. ábra Fröccsöntő csiga keverő hatása [27]

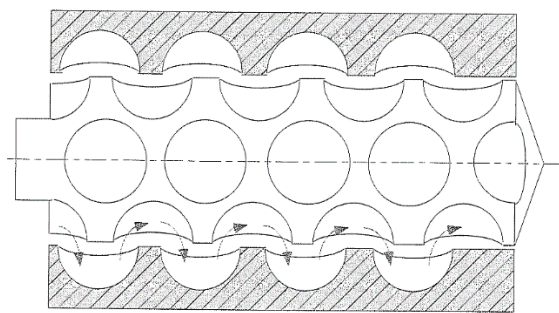
A csiga keverési hatékonyságának növelésére a legegyszerűbb mód a csiga módosítása keverőelemek beépítésével, vagy a geometria módosításával. Ilyen keverőelemek lehetnek például keverő ujjak (20./a ábra), vagy a csiga elejére felszerelhető keverő csigacsúcsok (20./b ábra).



20. ábra Fröccsöntő csigára szerelhető keverőelemek, a, keverőujjak b, keverő csigacsúcs [24]

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 20./b ábrán látható keverő csigacsúcs jellegzetessége, hogy az ömledékáramot egy szűk résen kényszeríti keresztül, így érve el a keveredés hatékonyságának növelését [24].

A keverő csigacsúcsok mellett érdemes megemlíteni a Cavity Transfer Mixerek (CTM) csoportját is (21. ábra). 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 üregecskében, pangó részek vannak az áramlásban. Emellett jelentős nyomásesés 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 [24].



21. ábra Cavity transfer mixer (CTM) [24]

Ezen felül még számos csigakialakítás létezik, amelyek növelik a csiga keverő teljesítményét. Ezekről a [24] irodalomban részletes leírásokat találhatunk.

2.5. 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 végelemek módszere [28].

Polimer termékek fejlesztési szakaszában is gyakran használnak ilyen programokat, amelyek közül az elsőket 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, vagy a megfelelő alapanyag kiválasztásában [28].

2.5.1. Szimulációs számítások használatának indokoltsága

A fröccsöntés modellezése során a legnagyobb problémát a bonyolult fizikai folyamatok leírása jelenti. A befröccsöntési fázisban, a szerszámüreg kitöltésekor fellépő jelentősebb számítási nehézségek [29]:

- 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 lesz 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

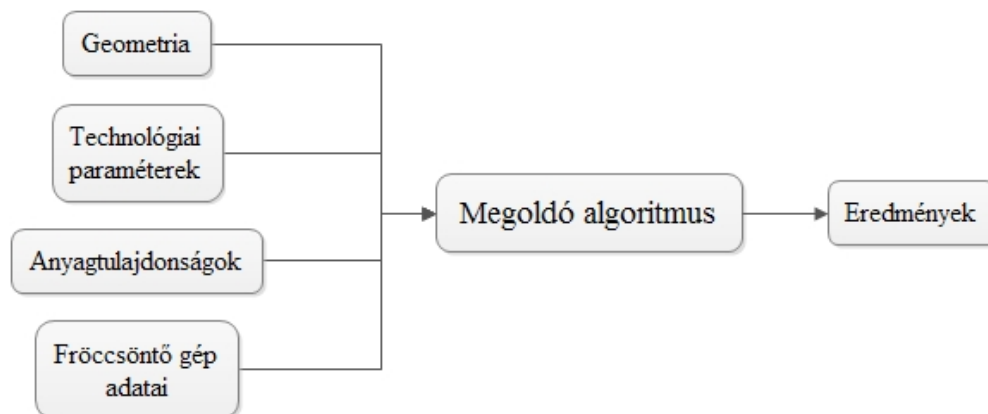
jelentősen változnak. A fajtérfogat változását a hőmérséklet és nyomás függvényében a p_vT diagramokból tudjuk leolvasni. Az utónyomási szakaszban lejátszódó hőtani folyamatok leírása is komplex, mély matematikai ismereteket igényel [29].

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 [29].

A modellezés 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 [29].

2.5.2. 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 [28, 30].

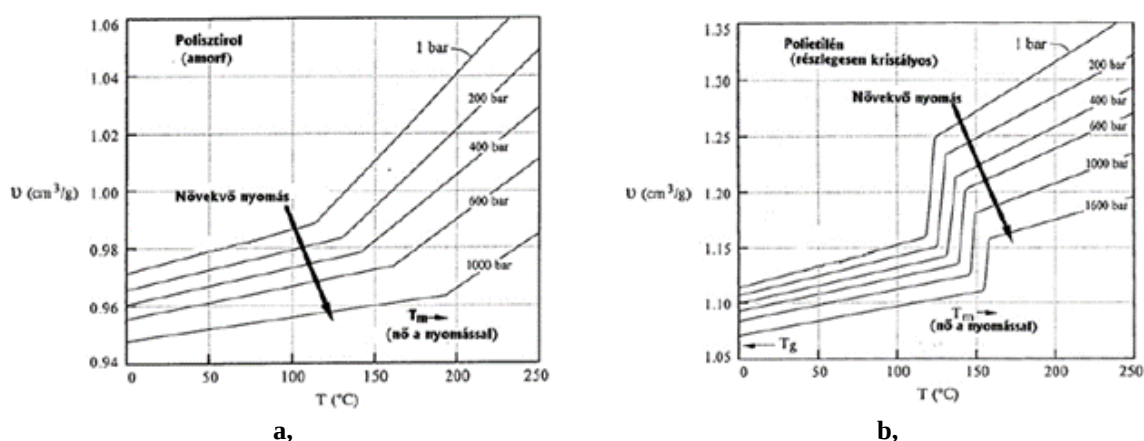


22. ábra A szimulációs programok működése [28]

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 [28]:

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

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 - v - T 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 [28, 30].



23. ábra Amorf (a) és részben kristályos (b) anyag p - v - T diagramja [2]

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 [28, 30].

A termék hálózása szükséges a végeleemes 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 [28, 30]:

- 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 [28, 30].

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 [28, 30].

2.5.3. A kitöltési fázis szimulációja

A TDK munka keretében elvégzett szimulációkkal statikus keverőelemeket vizsgálunk. A szimuláció során a kitöltési fázisban vizsgálom a keverőelemeken kialakuló nyomásesést. A nyomásesés a kitöltési fázis során a legjelentősebb a nagy áramlási sebességek miatt [29].

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 [29].

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 [29]:

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

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 folyadékreszek 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 folyadékresz mozgásmennyiségét. Ha a súrlódást elhanyagolnánk a folyadékban, akkor a folyadékreszre csak nyomásból származó erő hanta, azonban súrlódásos esetben a felületen nyíróerők is hatnak. Polimerömledékek esetén a mozgásállapot és a folyadékra ható erők közti kapcsolatot a 3. összefüggés írja le [31].

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

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 [31].

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 [31, 32].

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

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

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

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

3.1. Felhasznált alapanyagok

A mérőprogram kalibrálásához készített próbatestek elkészítéséhez ABS kopolimert (Styrolution, Terluran GP-35) használtam, amelyhez különböző mesterkeverékeket adalékoltam. A mesterkeverékeket és azok típusait a 2. táblázatban foglaltam össze.

2. táblázat A próbatestek gyártásához használt mesterkeverékek

Szín	Megnevezés
Halványsárga	BY
Vörös	BR
Narancs	FYO
Zöld	BYG
Sötétszürke	DSG
Világosszürke	MSG
Kék	MB
Sárga	Y
Világos lila	LP

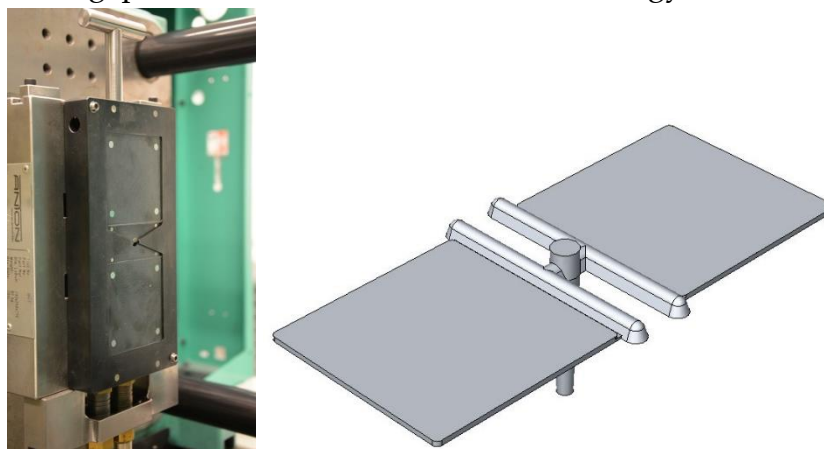
A statikus keverő homogenizáló képességének és a statikus keverőn fellépő nyomásesés meghatározásához készített próbatestek gyártásánál ABS terpolimert (*Styrolution*, *Terluran GP-35*) használtam, amelyhez rózsaszín (*Clariant*, *Renol-pink ABSI 43479Q*) mesterkeveréket adalékoltam [33].

A hővezetési és mechanikai vizsgálatokhoz használt alapanyag a TVK által gyártott, kereskedelmi forgalomban kapható polipropilén (PP, *TIPPLEN H145 F*) volt. Az alapanyag alacsony molekulatömegű, keskeny molekulatömeg-eloszlású homopolimer, ami magas MFI értékekkel rendelkezik (25g/10 min, 230°C-on és 2,16 kg terhelés alatt). Az alapanyag sűrűsége 0,9 g/cm³.

A hővezetési és mechanikai mérésekhez három féle töltőanyagot használtam; talkumot (QualChem; 35 µm), aminek sűrűsége 2,7 g/cm³, bór-nitridet (Henze Hebofil® 482), aminek sűrűsége 2,1 g/cm³, valamint grafént (XG Sciences, xGnP Graphene Nanoplatelets, Grade H).

3.2. Alkalmazott berendezések

A 80x80x2 mm-es lapka próbatestek (24. ábra) *Arburg Allrounder Advance 370S* 700-290 fröccsöntő gépen, kétfélszkes szerszámban lettek legyártva.



24. ábra Gyártószerszám a 80x80x2 mm-es lapka próbatesthez és a próbatest modellje beömlő- és elosztórendszerrel

A mérőprogram kalibrálásához használt próbatestek gyártásánál nem használtam keverőelemeket, míg a statikus keverő minősítéséhez készített próbatestekénél különböző belső átmérőjű és különböző elemszámú *StaMixCo SMN* típusú statikus keverőket használtam. A statikus keverők (25. ábra) 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.



25. ábra StaMixCo SMN típusú keverő és a benne található keverőelemek [22]

A próbatesteket *Epson Perfection V600 Photo* síkágyas lapszkennerrel digitalizáltam, a homogenizáló képesség méréséhez. A szkennert maximális felbontása 6400 dpi, a maximális munkatere pedig 216x297 mm. A szkennert LED fényforrások találhatók. A mechanikai és hővezetési méréseknél statikus és dinamikus keverőket is használtam a próbatestek elkészítésénél.



26. ábra Dinamikus keverő

A szakítóvizsgálatokat a Polimertechnika Tanszéken található Zwick Z020 szakítógépen végeztem el.

3.3. Vizsgálati módszerek

Ebben a fejezetben a diplomaterv elkészítése során alkalmazott mérési módszerek kerülnek bemutatásra.

3.3.1. Mérőprogram kalibrálása

A színes lapkákat különböző technológiai beállítások mellett fröccsöntöttük, amelyekről korábban elvégzett mérések alapján megállapítottuk, hogy hatással vannak a termékek homogenitására (3. táblázat). A mérések alapjául az A_01-es sorozat beállításait választottuk.

3. táblázat Technológiai beállítások az egyes mérési sorozatok esetén

Sorozat	Befröccsöntés sebessége [cm ³ /s]	Késleltetési idő [s]	Ömledék hőmérséklet [°C]
A_01	55	0	225
A_02	10	0	225
A_03	100	0	225
A_05	55	10.5	225
A_06	55	21	225
A_07	55	0	190
A_08	55	0	260

A technológiai beállítások az egyes sorozatok esetén csak az 3. táblázatban, szürkével kiemelt mezőkben található paraméterben tértek el egymástól. Az első referencia sorozatnál (A_01) a befröccsöntés sebessége 55 cm³/s volt, a ciklusok közt nem volt késleltetési idő és az ömledék hőmérséklete 225°C volt. Így a polimer ömledék 85 másodperces tartózkodási idő után került a 40°C-os szerszámüregbe. A

fröccsöntés során alkalmazott záróerő 700 kN volt. Minden sorozatból 10 próbatestet készítettem, amiket a Polimertechnika Tanszék által kifejlesztett képelemző szoftverrel elemeztem. A próbatesteket emberekkel is megvizsgáltattam és lepontoztattam, hogy a szoftvert kalibrálni tudjam az emberi kiértékeléshez. A későbbiekben ez hasznos lehet, hiszen a termékek végső felhasználói is emberek, akiknek szeretnénk a termékeinket eladni. Egy jól működő, objektív mérőrendszer segítségével könnyen ki lehet szűrni azokat a termékeket, amelyek minősége alacsony és már nem eladhatóak.

3.3.2. A színegyenetlenség mérése és a nyomásesés meghatározása

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:

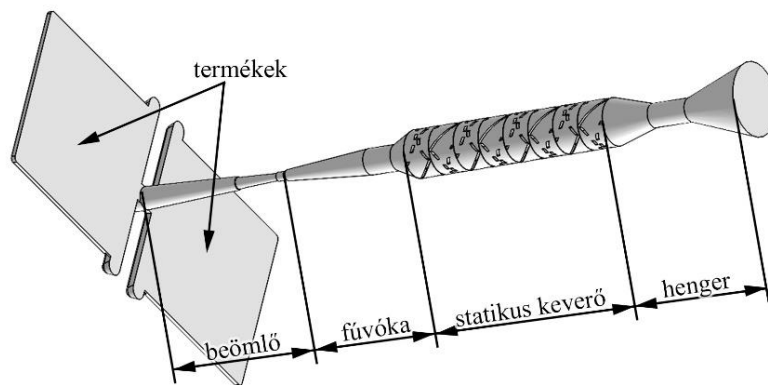
4. táblázat A fröccsöntő gép beállításai

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 lapszkennerrel. A szimulációs számításokat *Autodesk Moldflow Insight 2014* fröccsöntés-szimulációs szoftverrel végeztem el.

Nyomásesés meghatározása szimulációs szoftverrel

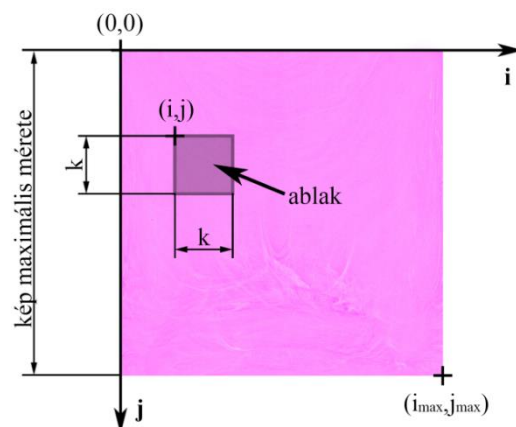
A fröccsöntés közben, a statikus keverőn fellépő nyomásesést vizsgáltuk a szimulációs modellekkel a kitöltési fázisban. A szimulációs modellek geometriája a 27. ábrán látható. A modell a fröccshenger csiga előtti részéből, a statikus keverő belső geometriájából, a fúvókából, beömlő és elosztó rendszerből, valamint a lapka próbatestből áll [33]. 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.



27. ábra Szimulációs számításokhoz használt CAD modell (8 keverőelem, 22 mm átmérő) [33]

Színegyenetlenség mérése

A színezőanyagok eloszlottságának a mérésére a *BME Polimertechika Tanszék* által kifejlesztett szoftvert használtam. A szoftver a fröccsöntött termékekről, próbatestekről készített digitális képek elemzésére alkalmas. Az elemzéshez .bmp formátumú képekre van szükség. Első lépésben a kép pixeljeihez tartozó színekoordináták RGB színértékeit Lab színértékekké konvertálja. A képek vizsgálatakor egy négyzetes, mozgó ablakkal, pixelről pixelre végigpásztázza a képet a szoftver (28. ábra). A mozgó ablak oldalhossza (k) 2 pixel és a kép rövidebb oldalhossza között választható meg. Minden lehetséges ablakpozícióban kiszámításra kerül az ablakon belül elhelyezkedő képpontok átlagos Lab színértéke. Minden ablakpozícióban és választott ablakméretben kiszámoljuk az ablakon belül elhelyezkedő pixel színekoordinátáinak Euklideszi távolságát az ablakon belüli pixel 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.



28. ábra Színegyenetlenséget mérő programban használt paraméterek [33]

3.3.3. Mechanikai és hővezetési tulajdonságok mérése

Mesterkeverék elkészítése, próbatestek gyártása

Az extrúzió során 190°C-tól 240°C-ig állítottam be a zónahőmérsékleteket. Az extruderszerszámból kilépő, szál formájú kompozitot vízben hűtöttem, majd ledaráltam. Ezzel az eljárással talkum-PP, BN-PP és grafén-PP kompozit mesterkeverékeket készítettem. A talkum és a bór-nitrid 30 térf%-ban lett a mátrixanyaghoz adalékolva, míg a grafén 2 térf%-ban. A fröccsöntés során a PP alapanyaghoz az előző lépésben elkészített mesterkeverékeket különböző mértékben adalékolva 10 sorozat próbatestet készítettem keverőelemenként. A próbatestek töltőanyagtartalmát az 5. táblázatban foglaltam össze.

5. táblázat A mesterkeverékek és próbatestek töltőanyagtartalma

Töltőanyag tartalom [vol%]	Mesterkeverék	Fröccsöntött minták			
		1	2	3	4
Talkum	30		5	10	20
Bór-nitrid	30		5	10	20
Grafén	2	0,2	0,5	1	2

A fröccsöntés során lapka próbatesteket gyártottam 80x80x2 mm-es befoglaló méretekkel. A fröccsöntés paramétereit megtalálhatóak a 6. táblázatban. A dinamikus keverő alkalmazásánál a fröccsparaméterek közül a torlónyomás és a plasztikálás sebessége lett megváltoztatva. A Dinamikus keverő 1 esetében a torlónyomás 20 bar volt, a plasztikálás a csiga kerületi sebessége pedig 15 m/perc volt. A Dinamikus 2 sorozatnál pedig ugyanazok az értékek 60 bar és 35 m/perc voltak.

6. táblázat Próbatestek gyártása során alkalmazott technológiai beállítások

Paraméter	Egység
Befröccsöntési térfogat [cm ³]	49
Befröccsöntési sebesség [cm ³ /s]	50
Utónyomás [bar]	Fröccsnyomás 80%-a
Utónyomás ideje [s]	10
Maradék hűtési idő [s]	10
Záróerő [kN]	650
Csiga kerületi sebessége [m/perc]	15
Ömledék hőmérséklet [°C]	200
Szerszám hőmérséklet [°C]	50

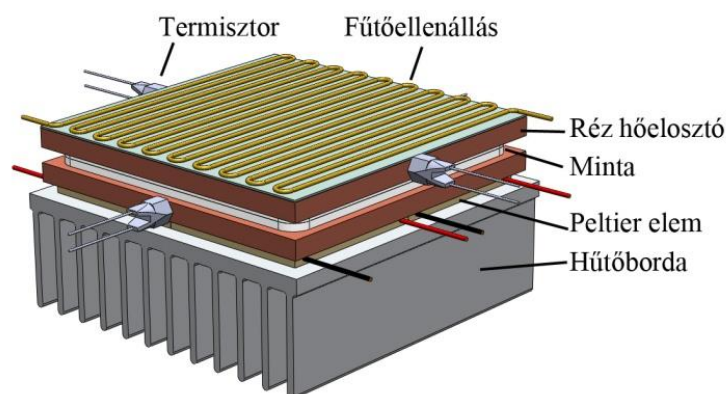
Mérési módszerek

A mechanikai vizsgálatok elvégzéséhez a piskóta alakú minták a lapka próbatestekből lettek vízzel kivágva. A piskóta próbatestek a fröccsöntési folyási iránnyal megegyezően lettek kialakítva, a méretei pedig megfelelnek az MSZ EN ISO 527-1:1999 szabvány 5A típusának. A szakító vizsgálatokat szobahőmérsékleten Zwick Z020 szakítógépen végeztem el 2 mm/perc-es keresztfejsebesség és 50 mm-es befogási hossz mellett. A feszültség-nyúlás diagramokból a próbatest Young modulusát és szakítószilárdságát határoztam meg.

A hővezetési tényező mérését egy Hot Plate elven működő mérőeszközzel valósítottam meg (29. ábra). A méréseknél a próbatestek végei közt hőmérsékletkülönbséget biztosítunk. A hőmérséklet gradiens hatására hővezetés indul meg az anyagban és a mérés állandósult állapotában a hővezetési tényező már könnyen kiszámítható a Fourier hővezetési törvény segítségével (5. összefüggés), a hőáram, a próbatestek vastagsága és a hőmérsékletkülönbség ismeretében.

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (5)$$

ahol $\partial Q/\partial t$ a hőáram, λ a hővezetési tényező, A a próbatestek hőáramra merőleges keresztmetszetének területe, ΔT a kialakult hőmérsékletkülönbség, Δx a minta hőáram irányába eső vastagsága. A hőmérsékletkülönbség villamos fűtéssel hozható létre, így a bevezetett villamos teljesítményből a hőáram kiszámítható [33].



29. ábra Hővezetés mérésére használt mérőberendezés elvi vázlata [33]

4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

Ebben a fejezetben a diplomaterv keretein belül elvégzett kísérletek kerülnek bemutatásra. Szó lesz a színegyenetlenség mérésére használt szoftver kalibrálásáról, az SMN statikus keverő minősítéséről, illetve a hővezetést javító adalékok hatásairól.

4.1. Eljárás kifejlesztése a színegyenetlenség számszerűsítésére

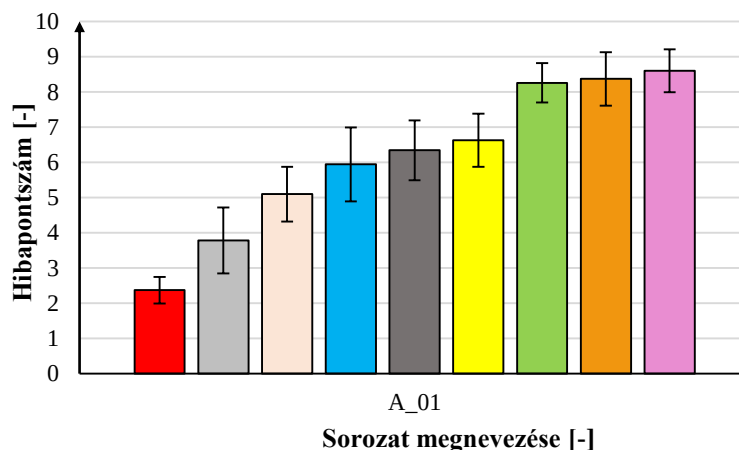
Ebben a részben a színegyenetlenség mérésére alkalmas mérőprogram kerül bemutatásra.

4.1.1. Humán kiértékelés

A diplomaterv egyik fő célja olyan mérőprogram kifejlesztése volt, amely képes a próbatestek színében fellépő egyenetlenségeket objektív módon képes értékelni. Fontos szempont, hogy a program által generált hibapontszámok jól korreláljanak az emberi pontozással. Ennek érdekében a legyártott próbatesteket emberekkel is kiértékelítettük. A kísérletben hét ember vett részt, akik minden egyes képet megnéztek és 1-től 10-ig terjedő skálán osztályoztak a termék színegyenetlensége szerint. A növekvő hibapontszámok jelentik a termék minőségének a romlását. Minél magasabb pontszámot adtak a próbatestre, annál nagyobb volt a termék színének egyenetlensége.

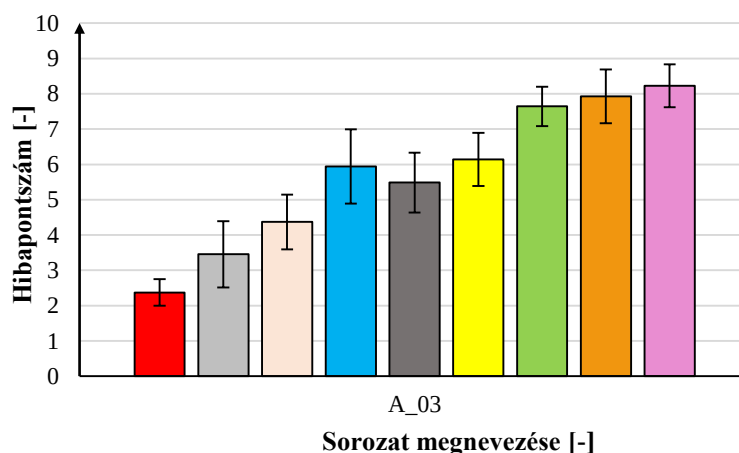
Technológiai beállítások hatása

A 30. ábrán az emberek által adott hibaértékek láthatók az A_01-es sorozat esetében. A képek hibaértékeiből megállapítható, hogy a különböző színű mesterkeverékkel gyártott próbatestek színegyenetlenségében jelentős eltérések vannak. A piros színű próbatestek kapták a legjobb értékelést, amíg a zöld, narancssárga és halványlila próbatestek homogenitása kimagaslóan rossz volt az emberek szerint.



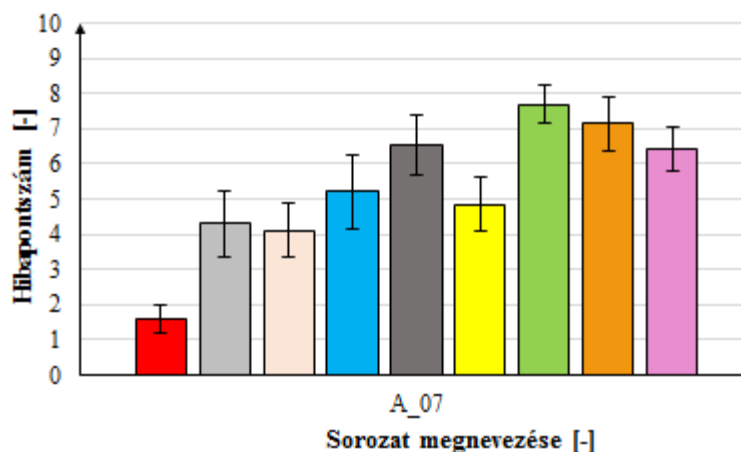
30. ábra Emberi kiértékelés pontszámai az A_01-es sorozat esetén

Az A_02-es és A_03-as sorozat kiértékelése azt mutatta, hogy a befröccsöntés sebességének szignifikáns hatása van a gyártott termékek homogenitására. Az A_03-as sorozat legyártásánál nagyobb áramlási sebességeket alkalmaztam, mint a többi sorozatnál. Ennek hatására több mesterkeverék használata esetén is javult a termékek homogenitása az emberek által adott hibapontok szerint (31. ábra).



31. ábra Emberi kiértékelés pontszámai az A_03-as sorozat esetén

Az A_07-es sorozat próbatestjeit 190°C-os ömledékhőmérséklettel gyártottam. Ezek a próbatestek szinte minden esetben jobb értékelést kaptak, mint az A_01-es sorozat (32. ábra). A próbatestek minőségjavulásának az oka feltehetőleg az, hogy alacsonyabb hőmérsékleten megváltoztak a polimer ömledék folyási tulajdonságai. A polimerek folyóképessége a hőmérséklet csökkenésével romlik, aminek hatására nagyobb nyíróerők ébrednek az ömledékben a feldolgozás során.



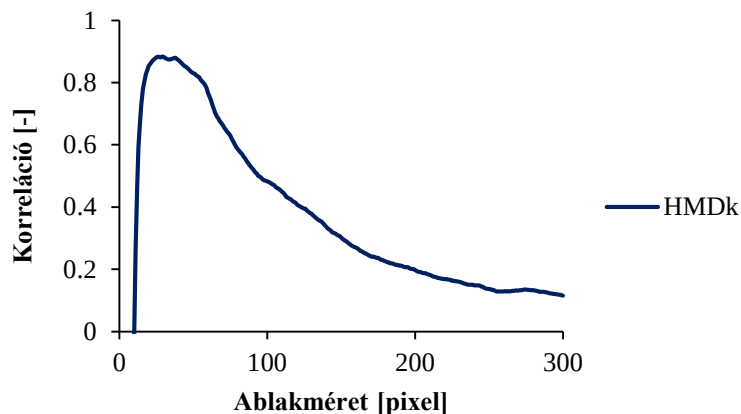
32. ábra Emberi kiértékelés pontszámai az A_07-es sorozat esetén

Mesterkeverékek minősítése

Az emberek kiértékelése alapján nem csak a technológia paraméterek hatásaival kapcsolatban vonhatunk le következtetéseket. A 30. 31. és 32. ábrán jól megfigyelhető, hogy vannak könnyen elkeverhető színezőanyagok és olyanok is, amelyek elosztatása körülményes. A piros mesterkeverék minden esetben jó pontszámokat kapott, tehát nem volt érzékeny a technológiai beállítások módosítására. A legnagyobb ingadozás a világos lila és a citromsárga mesterkeverékkel gyártott termékek homogenitásában figyelhető meg. Ezeknél a mesterkeverékeknel különösen fontos a fröccsöntési paraméterek helyes megválasztása.

4.1.2. Kiértékelés a képelemző szoftverrel

A próbatesteket kiértékeljük a színeképelemző programmal, majd az eredményeket összevetettük az emberek által adott hibaértékekkel. A halvány lila színezőanyaggal gyártott próbatesteket vizsgáltuk első körben, mivel ezeknél a hiba szemmel is jól érzékelhető volt. A vizsgálat eredményeként (33. ábra) azt tapasztaltuk, hogy a HMD_k értékek $k=15$ pixel ablakmérettől körülbelül $k=70$ pixeles ablakméretig viszonylag jól korrelálnak a humán pontszámokkal (a korrelációs együttható 0,75 felett van). A korreláció maximum értéke $R=0,88$, amit $k=28$ pixeles ablakméretnél értünk el.

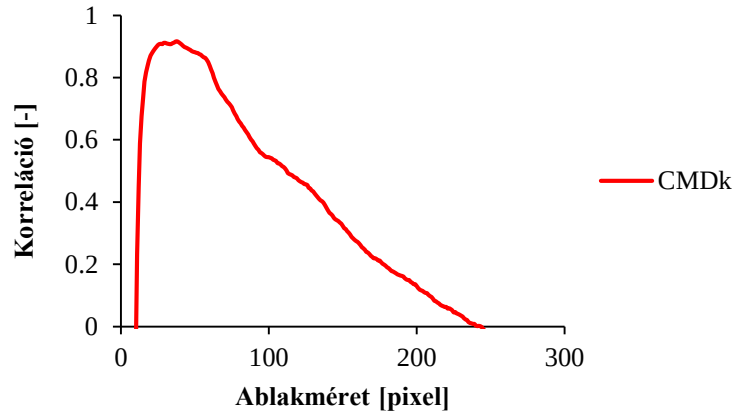


33. ábra Halványlila színű próbatestek HMD_k értékeinek korrelációja az emberi hibapontszámokkal

A továbbiakban a HMD_k értékeket különböző módon korrigáltuk és vizsgáltuk a korrelációs együttható változását. A program által adott HMD_k értékeket megvizsgálva elmondható, hogy az ablakméret növelésével a HMD_k értékek monoton csökkennek, és egy határértékhez tartanak. Egy tanszéki kutatás keretein belül Zsíros L. [35] és társai mérésekkel megállapították, hogy a méréseknek van egy úgynevezett alap zajszintje, ami több tényezőtől is függ. Ezt az alapszintet nagyban befolyásolja a próbatest színe és jó közelítéssel megegyezik a k=610 pixel oldalhosszúságú ablakhoz tartozó GMD értékkel. Állításukat előszínezett, kompaundált anyagokon végzett mérésekkel igazolták, mivel ezek inhomogenitása közel zérus. A kompaundált alapanyagból készített próbatestek kiértékelése során azt tapasztalták, hogy a kapott hibaértékek megegyeznek az egyes mesterkeverékekkel előállított próbatestek GMD értékeivel. Ahhoz, hogy az egyes színeket egymással össze lehessen hasonlítani, a HMD_k hibaértékeket az 6. összefüggés szerint korrigáltuk. A korrigált HMD_k értékek és az emberek által adott hibaértékek kapcsolatát a 34. ábra mutatja.

$$CMD_k = HMD_k - GMD, \quad (6)$$

ahol CMD_k a k pixel oldalhosszúságú ablakhoz tartozó korrigált hibaérték, HMD_k a k pixel oldalhosszúságú ablakhoz tartozó hibaérték, GMD pedig a maximális ablakmérethez tartozó MD érték.



34. ábra Halványlila színű próbatestek CMDk értékeinek korrelációja az emberi hibapontszámokkal

A korrigált hibapontszámok korrelációs együtthatójának maximuma $k=37$ pixeles ablakméretnél van, értéke pedig $R=0,92$. Ezután megvizsgáltuk, hogy a program által generált hibapontszámok korrelációja milyen változásokat mutat, ha átlagoljuk a hibaértékeket. Az átlagolást a 7. és 8. összefüggés szerint végeztük.

$$AVHMD_k = \frac{\sum_{i=2}^k HMD_i}{k-1}, \quad (7)$$

ahol, $AVHMD_k$ az első „ $k-1$ ” darab ablakmérethez tartozó hibaértékek (HMD) átlaga, HMD_k a k pixel oldalhosszúságú ablakhoz tartozó hibaérték.

$$AVCMD_k = \frac{\sum_{i=2}^k CMD_i}{k-1}, \quad (8)$$

ahol, $AVCMD_k$ az első „ $k-1$ ” darab ablakmérethez tartozó korrigált hibaértékek (CMD) átlaga, CMD_k a k pixel oldalhosszúságú ablakhoz tartozó korrigált hibaérték.

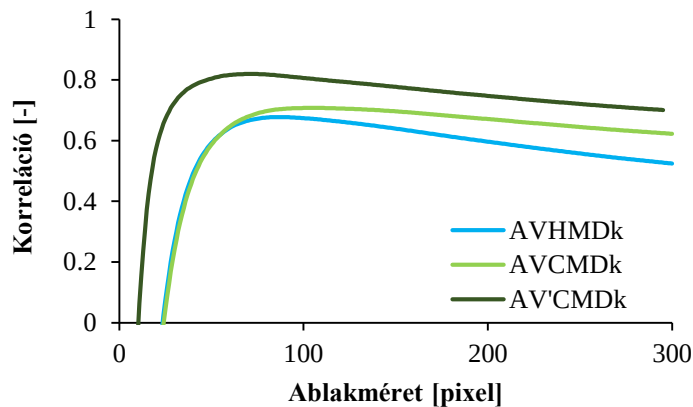
Az így kapott hibaértékeket az eddigiekhez hasonló módon összevetettük az emberi kiértékeléssel. A korrelációs együtthatók változását az ablakméret függvényében a 35. ábra szemlélteti. Az ábrán látható még egy korrelációs görbe, ami a 8. összefüggés alapján számított $AVCMD_k$ értékek módosításából adódik. A módosítás során a számításból kihagytuk a 7 pixeles, vagy annál kisebb ablakmérethez tartozó HMD_k értékeket (9. összefüggés). Ennek oka az, hogy a mérési módszer szkennelésből adódó bizonytalansága drasztikusan megnő 5 pixel alatti ablakméretek használata esetén [35].

$$AV'CMD_k = \frac{\sum_{i=7}^k CMD_i}{k-6}, \quad (9)$$

ahol, $AV'CMD_k$ a 7 pixel ablakméret feletti HMD értékekből számolt korrigált

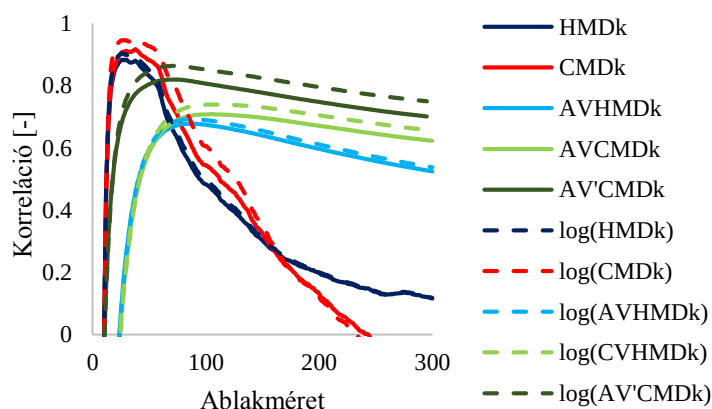
hibaértékek (CMD) átlaga, CMD_k a k pixel oldalhosszúságú ablakhoz tartozó korrigált hibaérték.

A vizsgálat alapján elmondható, hogy az átlagolással kapott hibapontok körülbelül 50 pixeles ablakméret felett stabilan korrelálnak az emberi kiértékelés pontjaival, de a korreláció maximum értéke jóval kisebb, mint a nem átlagolt hibaértékeké.



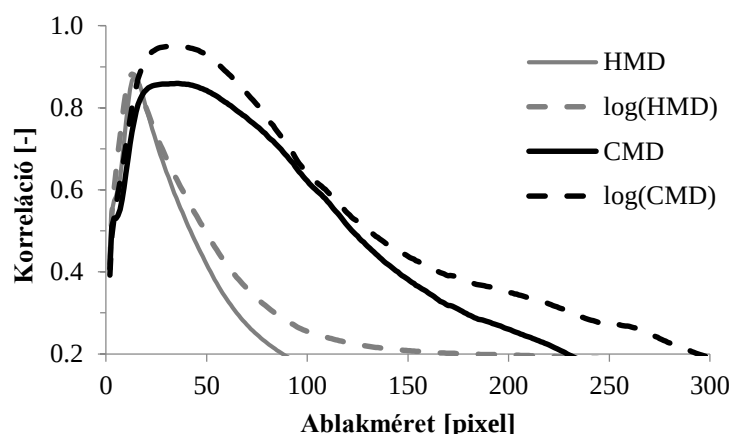
35. ábra Halványlila színű próbatestek AVHMDk és AVCMDk értékeinek korrelációja az emberi hibapontszámokkal

A korrelációs vizsgálatot elvégeztük az előzőekben tárgyalt hibaértékek logaritmikus transzformációját követően is. A 36. ábra az összes korrigált és logaritmikus hibaértékekhez tartozó korrelációs görbéket mutatja. A logaritmikus transzformáció minden esetben javította a korreláció értékét. A legjobb eredményeket a CMD_k hibaérték logaritmizálása után értük el, $k=38$ -as ablakméretnél. Ettől az értéktől nem sokban marad el a HMD_k hibaérték és annak logaritmizált alakja. Halványlila szín esetén nagyon jó korrelációs értékeket sikerült elérni az $AV'CMD_k$ hibaértékek logaritmusával is.



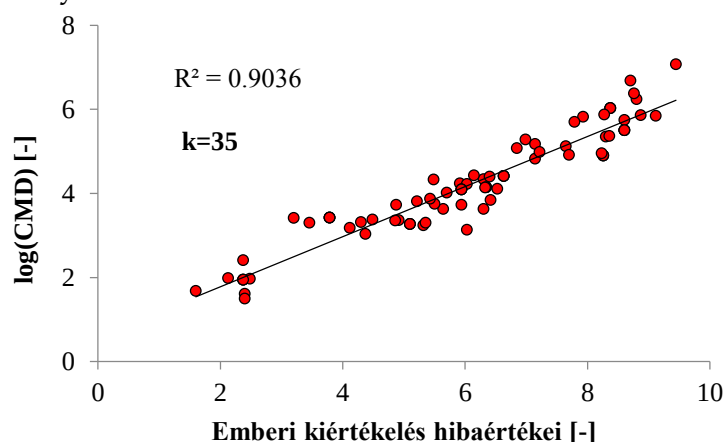
36. ábra Halványlila színű próbatestek korrigált és logaritmikus hibaértékeihez tartozó korrelációs görbék összehasonlítása

Mivel a célunk olyan mérőrendszer kialakítása volt, amely univerzálisan használható a fröccsöntött termékek inhomogenitásának mérésére, megvizsgáltuk, hogy a többi szín átlagos hibaértékei hogyan korrelálnak az emberi kiértékeléssel az ablakméret függvényében (37. ábra). A korrelációs vizsgálatot csak a HMD_k és CMD_k értékekre végeztük el, mert a rózsaszín próbatetek vizsgálatánál már kiderült, hogy különböző módon átlagolt hibaértékek maximális korrelációja elmarad a nem átlagolt hibaértékekétől.



37. ábra A sorozatok átlagos hibaértékeinek és korrigált hibaértékeinek korrelációja az emberi kiértékeléshez, minden szín esetén

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a kép jellemzésére használt hibaértékek közül a legmagasabb korrelációt a CMD_k értékek logaritmikus transzformációja után érték el. A korrelációs együttható maximuma 35 pixeles ablakméret használata esetén adódott. A 38. ábrán az összes színhez tartozó, minden sorozat átlagos hibaértéke látható párhuzamba állítva az emberek által adott hibaértékek átlagával. A két adatsor közti korrelációs együttható $R=0,95$. Az eredmények alapján elmondható, hogy a számítási módszer arányos az emberi kiértékelés eredményeivel.



38. ábra A sorozatok szoftveres és emberi kiértékelésének összehasonlítása $k=35$ pixeles ablakméret alkalmazása esetén

Ez után az így kapott összefüggésünket a 10. összefüggés szerint módosítottuk, annak érdekében, hogy a hibaértékek azonos nagyságrendben legyenek az emberek által adott pontszámokkal.

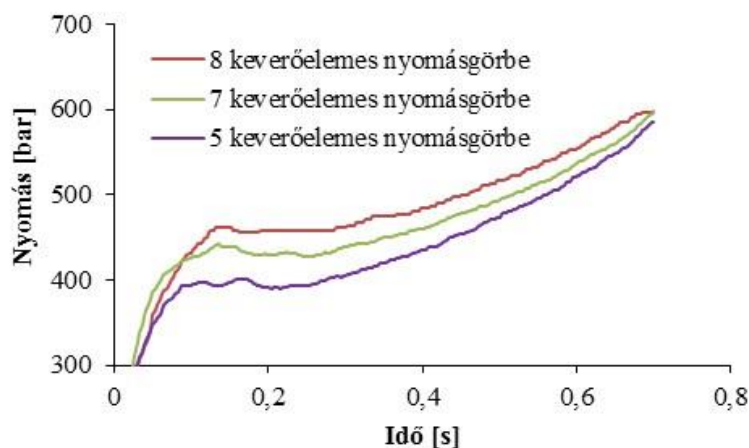
$$\text{Hibaérték} = C_1[\log(\text{CMD}_k) + C_2], \quad (10)$$

ahol C_1 és C_2 konstansok, CMD_k pedig a korrigált hibaérték. Ha C_1 értékét 5-re és C_2 értékét 1-re választjuk meg, akkor a program által adott pontszámok jó közelítéssel megegyeznek az emberek által adott pontszámok átlagával.

4.2. Statikus keverőn fellépő nyomásesés vizsgálata

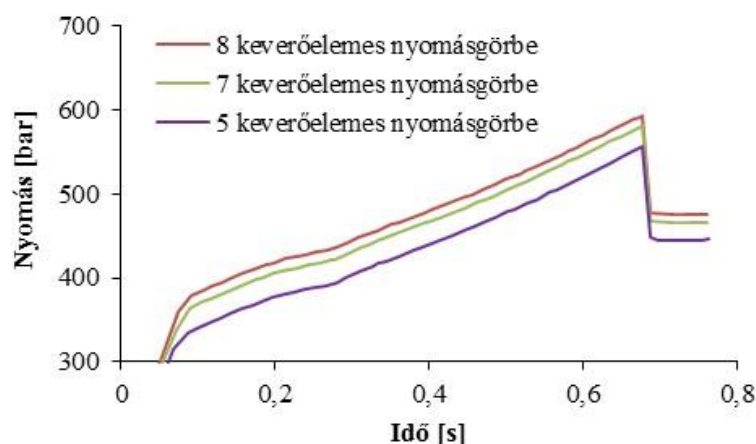
Gazdasági szempontból igen fontos tudni, hogy a keverő alkalmazása milyen hatással lesz a fröccsöntési ciklusra. Bonyolult, zeg-zugos kialakítása miatt, jelentős nyomástöbbletre van szükségünk ahhoz, hogy a polimer ömledéket keresztülnyomjuk rajta. A nyomásigény növekedését több tényező is, mint például 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 nyomásgörbéket hasonlítottam össze. A 39. és 40. ábrán az 5, 7 és 8 keverőelemes 22 mm belső átmérőjű statikus keverőn mért és ezek modelljein számított nyomásgörbék láthatók.



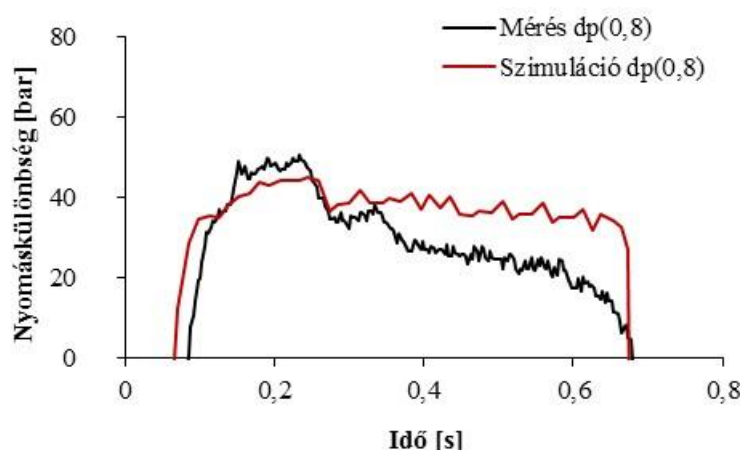
39. ábra Fröccsöntő gépen mért nyomásgörbék

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.



40. ábra Szimulációs szoftverrel számított nyomásgörbék

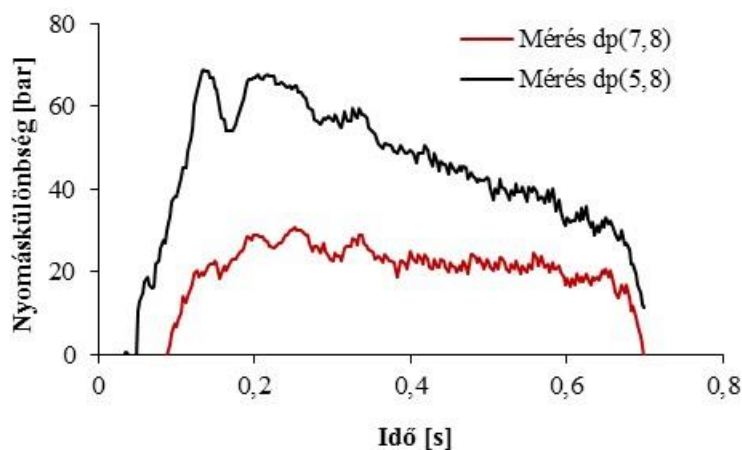
Ezután megvizsgáltam, hogy a statikus keverő alkalmazása milyen hatással van a fröccsöntési ciklusra. Ehhez a fröccsöntő gép hagyományos fúvókáján és a 8 keverőelemes 22 mm belső átmérőjű statikus keverőn fellépő nyomáseséseket hasonlítottam össze. A 41. ábrán a két mérési összeállítás nyomásgörbéi közti 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 nyomáskülönbségekről van szó.



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

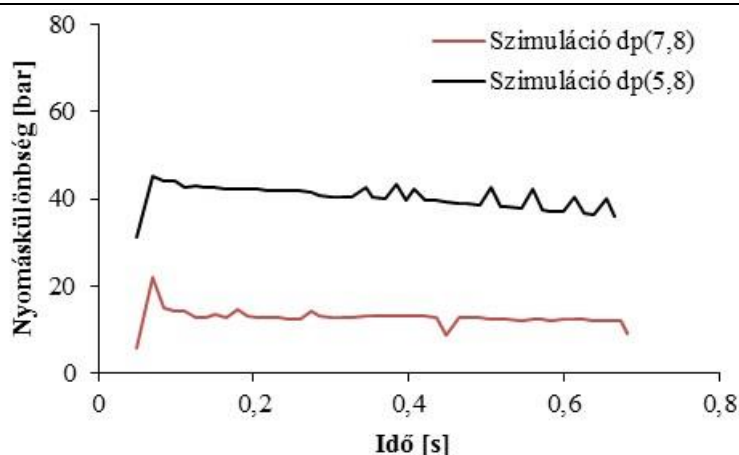
Az 41. ábrán látható szimulációs és mért adatokból számított nyomásgörbék különbségéről szintén elmondható, hogy a fröccsöntés során kialakuló nyomásviszonyokhoz képest, a köztük lévő eltérés, ami körülbelül 5-10 bar,

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 42. ábrán az 5, 7 és 8 elemes keverők összehasonlítása látható.



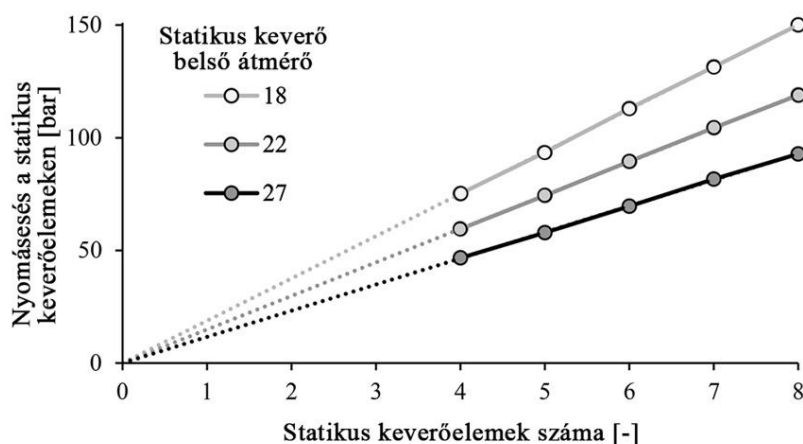
42. ábra A fröccsöntéshez szükséges nyomásigény változása az elemszám függvényében a 22 mm belső átmérőjű statikus keverő esetén (mérésekből)

A 42. 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 (43. ábra) azt tapasztaljuk, hogy a nyomásigény növekedése az előbb említett esetben 15 bar, az utóbbinál pedig körülbelül 45 bar, ami nem sokban tér el a mért értékektől.



43. 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.



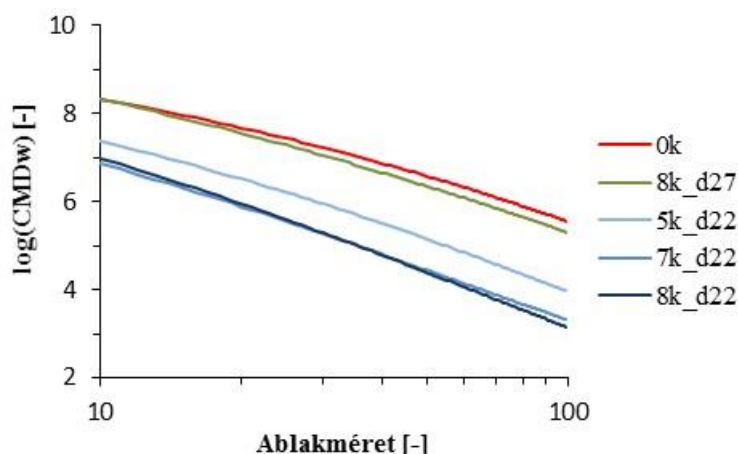
44. ábra Statikus keverőn fellépő nyomásesés az elemszám és a belső átmérő függvényében (szimuláció)

A 44. 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.

4.3. Statikus keverő homogenizáló képességének minősítése

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



45. ábra Statikus keverőelemek számának hatása a próbatestek színegyenetlenségére

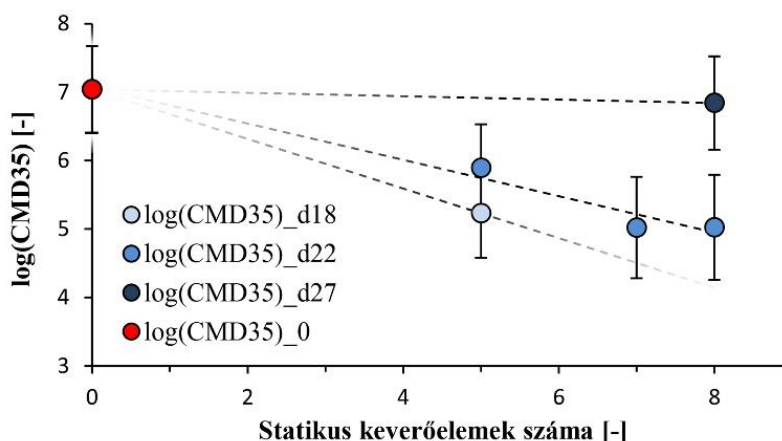
A mérések során a keverőelem nélküli, az 5 keverőelemes 18 mm-es, az 5, 7 és 8 keverőelemes 22 mm-es és a 8 keverőelemes 27 mm belső átmérőjű összeállításokat vizsgáltam. Az eredményeket a 45. ábra mutatja, amin a korrigált hibaértékek láthatók az ablakméret függvényében a 4.1.2 fejezetben ismertetett logaritmikus transzformáció után. 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 hibaértékét. Ahogy a 45. 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 fúvóka. 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

fúvókához 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 színegyenletlenséget mérő program előzetes tesztelése azt mutatta, hogy a 35 pixel oldalhosszúságú ablakmérethez tartozó HMD_{35} értékek korrigálnak a legjobban az emberi színérzékeléséhez.

A 46. 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 46. ábrán a meglévő mérési eredményekre illesztett egyenesek meredeksége az elemek keverési hatékonyságával van kapcsolatban.



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

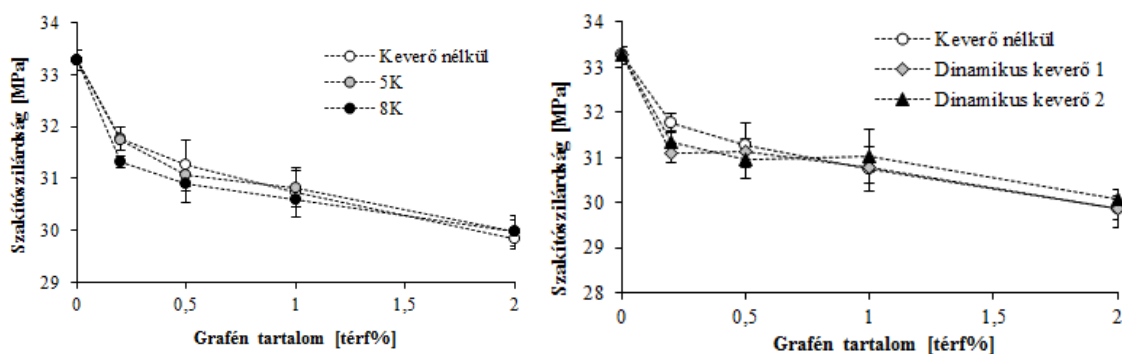
4.4. Keverők hatása a töltőanyagok eloszlottságára

Az elkészített mintákat első lépésben szakítóvizsgálatoknak vetettem alá. A szakító diagramok kiértékelése során meghatároztam a próbatestek húzószilárdságát és rugalmassági modulusát a szakítógörbe kezdeti szakaszából.

4.4.1. Mechanikai tulajdonságok vizsgálata

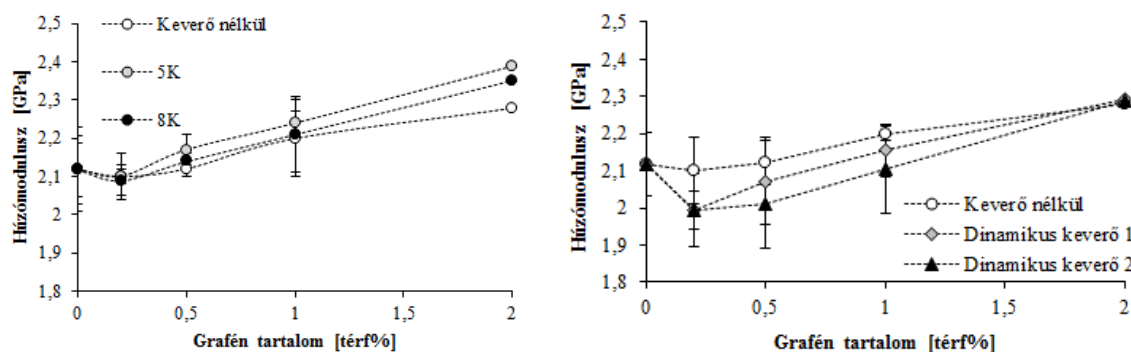
Grafén töltőanyag mennyiségének és a keverőelemek számának hatása a próbatestek mechanikai tulajdonságaira

A 47. ábrán a grafénnal töltött PP mátrixú kompozit próbatestek szakítószilárdsága látható a graféntartalom függvényében, valamint az alkalmazott keverőelemek számának és típusának hatása is fel van tüntetve. A mérési eredmények alapján elmondható, hogy a graféntartalom növelésével a próbatestek húzószilárdsága csökkent. A statikus keverőben alkalmazott keverőelemek számának (5K, 8K) hatása nem szignifikáns. A dinamikus keverők esetén az egyik technológia beállítás során a plasztikálás kíméletes volt (Dinamikus keverő 1), a másik esetén pedig nagy nyírősebességeket alkalmaztunk (Dinamikus keverő 2). Dinamikus keverő alkalmazása esetén a különböző technológiai beállítások sem okoztak jelentős változást a próbatestek mechanikai tulajdonságaiban. A mérési eredményekkel kimutattam, hogy már kis mennyiségű grafén töltőanyag hatására is jelentősen csökken a próbatestek szakítószilárdsága.



47. ábra Grafénnal töltött polipropilén mátrixú kompozit szakítószilárdsága a keverőelemek számának, a keverő típusának és a töltőanyag mennyiségének függvényében

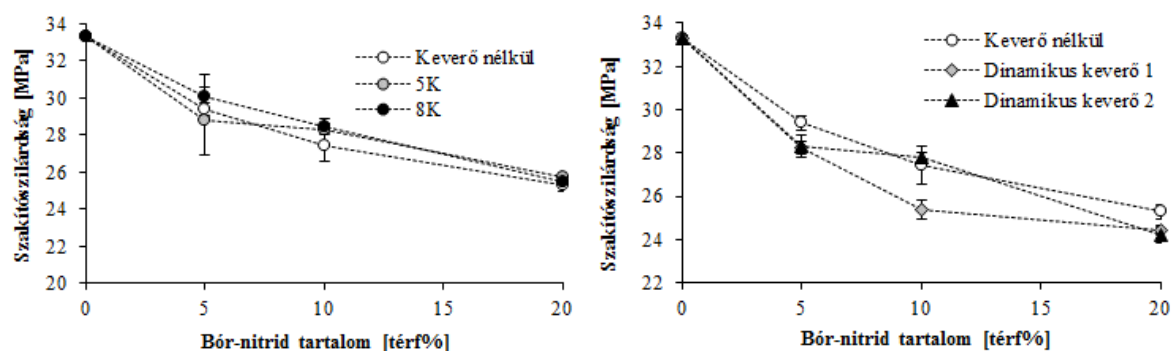
A 48. ábrán a grafénnal töltött PP mátrixú kompozit próbatestek rugalmassági modulusa látható a graféntartalom függvényében. A mérésekből megfigyelhető, hogy a graféntartalom növelésével egyre nagyobb húzórugalmassági modulusértékeket kaptam. Az alkalmazott keverőelemek számának növelése nem okoz kimutatható különbségeket. Az eredmények úgy, mint a szakítószilárdság esetén, itt is körülbelül azonos átlag körül szóródnak. A dinamikus keverő alkalmazása esetén a próbatestek húzórugalmassági modulusa kisebb mértékben nőtt a grafén mennyiségének növelésével, mint a statikus keverő alkalmazása esetén, azonban ha figyelembe vesszük a statikus keverő esetén a próbatestek modulusának szórását, nem jelenthetjük ki, hogy a statikus keverő alkalmazásával nagyobb modulusértékek érhetők el.



48. ábra Grafénnal töltött polipropilén mátrixú kompozit rugalmassági modulusa a keverőelemek számának, a keverő típusának és a töltőanyag mennyiségének függvényében

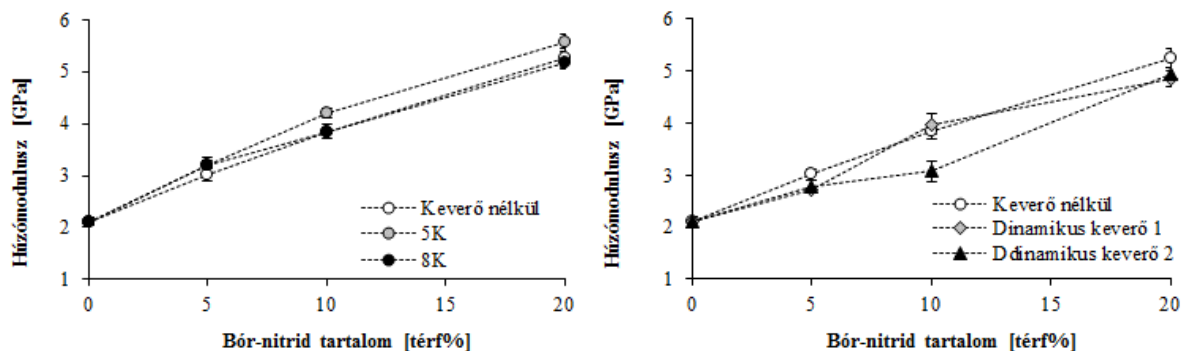
Bór-nitrid töltőanyag mennyiségének és a keverőelemek számának hatása a próbatestek mechanikai tulajdonságaira

A bór-nitriddel töltött polipropilén mechanikai tulajdonságai hasonlóképpen változtak, mint a grafénnal töltött esetben (49. ábra). A bór-nitrid töltőanyag mennyiségének növelésével csökkent a kompozit szakítószilárdsága. Látható, hogy itt a szakítószilárdság jóval nagyobb mértékben lecsökkent, mint a grafénnal töltött kompozit próbatestek esetén, azonban a bór-nitrid jóval nagyobb arányban lett a PP-hez adalékolva. A keverőelemek hatása úgy, mint a grafén esetén itt is elhanyagolható.



49. ábra Bór-nitriddel töltött polipropilén mátrixú kompozit szakítószilárdsága a keverőelemek számának, a keverő típusának és a töltőanyag mennyiségének függvényében

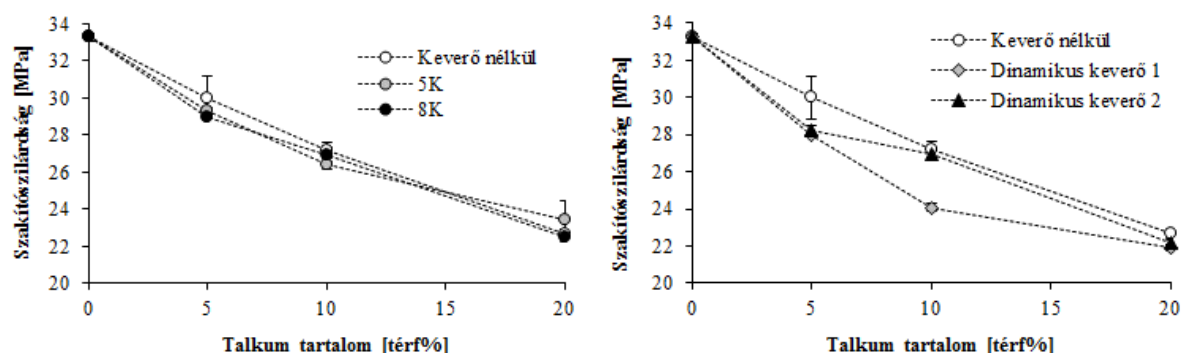
Az 50. ábrán a bór-nitriddel töltött polimer kompozit próbatestek rugalmassági modulusának alakulása látható a keverőelemek számának, a keverő típusának és a töltőanyag tartalomnak a függvényében. Hasonlóképpen a szakítószilárdsághoz, itt is jóval nagyobb mértékű a töltőanyag hozzáadása miatt bekövetkező változás. A mérések azt mutatták, hogy 20 térf% bór-nitrid hozzáadása több mint a duplájára növeli a húzórugalmassági modulus értékét, azaz nagymértékben ridegíti a kompozitot. A keverőelemek alkalmazásával a húzórugalmassági értékek nem változtak meg.



50. ábra Bór-nitriddel töltött polipropilén mátrixú kompozit rugalmassági modulusa a keverőelemek számának, a keverő típusának és a töltőanyag mennyiségének függvényében

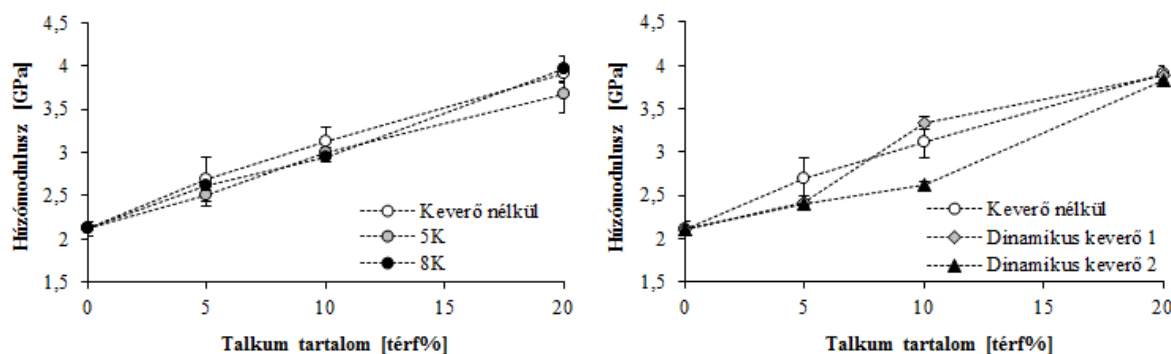
Talkum töltőanyag mennyiségének és a keverőelemek számának hatása a próbatestek mechanikai tulajdonságaira

A talkum töltőanyag alkalmazásának hatása a mechanikai tulajdonságokra egy nagyságrendbe esik a bór-nitrid hatásával (51. és 52. ábra). A 20% talkummal töltött polipropilén alapú kompozit húzószilárdsága 10 MPa-al kevesebb, mint a töltetlen polipropiléné. A statikus keverő nélküli fúvókával és statikus keverővel gyártott próbatestek mechanikai tulajdonságai közt, a talkummal való töltés esetén sem figyelhető meg szignifikáns különbség, valamint a dinamikus keverő hatása is elhanyagolható.



51. ábra Talkummal töltött polipropilén mátrixú kompozit szakítószilárdsága a keverőelemek számának és a töltőanyag mennyiségének függvényében

A húzórugalmassági modulus csakúgy, mint a bór-nitrid adagolása esetén növekszik a töltőanyag tartalom növelésével a vizsgált tartományban (52. ábra). 20 térf% talkum hozzáadásával a polipropilén mátrix húzómodulusa a duplájára növelhető.



52. ábra Talkummal töltött polipropilén mátrixú kompozit rugalmassági modulusa a keverőelemek számának és a töltőanyag mennyiségének függvényében

Összehasonlítva a különböző töltőanyagokat elmondható, hogy a bór-nitrid alkalmazása a célravezető. Bór-nitrid nagymértékű alkalmazásával a szakítószilárdság kisebb mértékben csökkent, mint talkum adalékolása esetén és a húzórugalmassági modulus is nagyobb mértékben növekedett. Grafén alkalmazása esetén már kis töltőanyag mennyiség esetén is jelentősen lecsökkent a szakítószilárdsága a kompozitnak, illetve a húzórugalmassági modulus értéke sem nőtt akkora mértékben, mint a másik két töltőanyag használatakor. A töltőanyagtartalom hatása mellett a keverő típusának és a keverőelemek számának a hatása elhanyagolható.

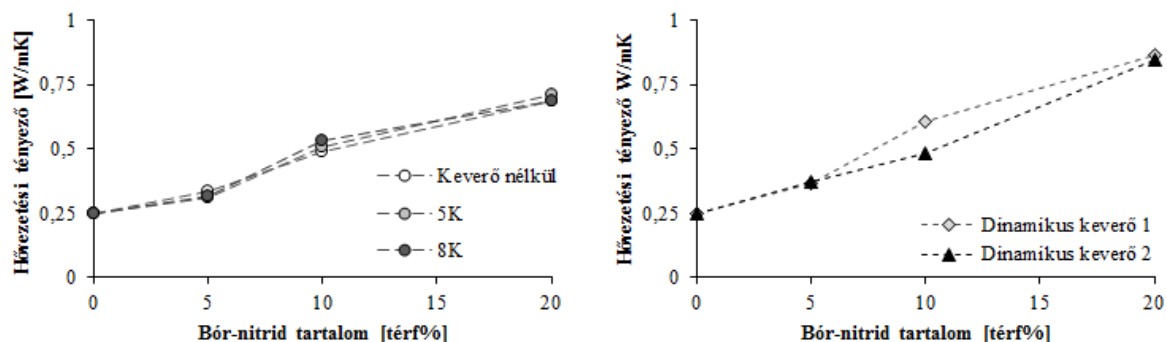
4.4.2. Hővezetési tényező vizsgálata

A polimerek hővezetési tényezője, mint azt már az irodalmi részben is említettem, körülbelül 0,2-0,5 W/mK tartományba esik. A polipropilén hővezetési tényezője 0,25 W/mK körül van. Az előző fejezetben vizsgált töltőanyagok mindegyikével lehetséges a hővezetési tulajdonságok javítása. A méréseknél vizsgáltam a különböző töltőanyagtartalom, valamint a keverőelemek számának hatását a hővezetésre.

A hővezetési tulajdonságok csak a bór-nitrid és talkum töltőanyag hozzáadása esetén növekedtek kimutatható mértékben. Grafén hozzáadásával a sima polipropilénhez képest sikerült körülbelül 0,32 W/mK hővezetési tényezőt elérni 0,2 térf% töltőanyaggal, viszont a töltőanyag tartalom növelése már nem növelte tovább a kompozit hővezetési tényezőjét. A grafén nagyobb mértékben történő adagolása azonban nem elterjedt, de alkalmazása hasznos lehet hibrid rendszerek esetén, ahol más hővezető adalékokat is használunk, mivel kapcsolatot teremt a mikrotöltőanyag részecskéi közt, így növelve a kompozit hővezetési tényezőjét.

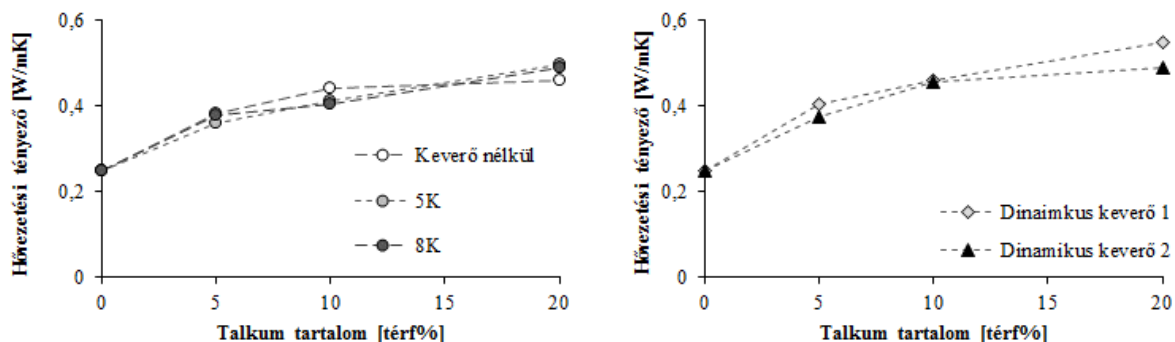
Bór-nitrid hozzáadásával a hővezetési tényező viszont jelentősen megnövelhető (53. ábra). Már kis mennyiség hozzáadásával (5 térf%) is 0,3 W/mK érték elérhető. Ha a polipropilén mátrixhoz 20 térf% bór-nitridet adalékoltam a hővezetési tényező értéke majdnem a 3-szorosára nőtt a töltetlen polipropilénhez képest. A statikus keverőben alkalmazott keverőelemek nem befolyásolta jelentősen a mérési

eredményeket. Dinamikus keverővel valamivel nagyobb hővezetési tényezőt sikerült elérni bór-nitrid töltés esetén. Statikus keverő esetén a maximális hővezetési érték 0,71 W/mK volt, míg a dinamikus keverők esetén 0,86 W/mK.



53. ábra Bór-nitriddel töltött polipropilén mátrixú kompozit hővezetési tulajdonságának változása a töltőanyag mennyiségének és a statikus keverőelemek számának függvényében

A 54. ábrán látható, hogy talkum töltőanyag hozzáadása a rendszerhez hasonlóképpen a bór-nitridhez, növeli a kompozit hővezető képességét. A hővezetési tényező értéke 5 térf% töltőanyag tartalom esetén megegyezik a két esetben, azonban a töltőanyag mennyiségének növelésével a hővezetési tényező nagyobb mértékben növekszik a bór-nitrid esetén. A statikus keverőelemek hatását a talkummal töltött rendszer esetén sem sikerült kimutatni és a dinamikus keverő alkalmazása sem okozott kimutatható különbségeket a hővezetési tényezőkben.



54. ábra Talkummal töltött polipropilén mátrixú kompozit hővezetési tulajdonságának változása a töltőanyag mennyiségének és a statikus keverőelemek számának függvényében

5. ÖSSZEFOGLALÁS

5.1. Eredmények kiértékelése

A diplomaterv 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 irodalomkutatást végeztem a fröccsöntési folyamat szimulációjának lehetőségei, a szimulációs programok működésének témakörében.

A diplomaterv gyakorlati részében részletesen vizsgáltam 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.

A diplomaterv keretein belül elvégeztem a termékek színegyenetlenségének mérésére kifejlesztett mérőprogram kalibrálását is. A kalibráláshoz próbatesteket készítettem különböző színű mesterkeverékekből, különböző technológiai beállítások mellett. A mintákat egy a színegyenetlenség mérésére alkalmas programmal kiértékeltem, valamint szakképzett mérőszeméllyel kiértékeltettem. A programból származó és az emberi kiértékeléssel kapott pontszámok közti korrelációt vizsgáltam. A szoftveres pontszámokat különböző matematikai módszerekkel korrigáltam annak érdekében, hogy javítsam az adatsorok közti korreláció értékét. Eredményül azt kaptam, hogy a 35-ös ablakmérettel számolt, korrigált hibaértékek korreláltak a legjobban az emberi kiértékeléssel. A statikus keverő minősítésénél ezt az összefüggést használtam a statikus keverő homogenizáló képességének a meghatározására.

A statikus keverő minősítése után vizsgálatot végeztem és megállapítottam, hogy a dinamikus keverő hatékonysága meghaladja az SMN statikus keverőét, ezért a hővezetést javító adalékok hatásának vizsgálatakor nem csak statikus keverővel, hanem dinamikussal is készítettem próbatesteket. A próbatestek különböző töltőanyag tartalommal lettek legyártva. A statikus keverő esetében vizsgáltam a keverőelemek számának hatását is. Dinamikus keverő használata esetén a technológia beállítást változtattam. A méréseim eredményei alapján kijelenthető, hogy mind a grafén, talkum és bór-nitrid alkalmazása esetén romlottak a mechanikai tulajdonságok. A kompozitoknak lecsökkentek a szakítószilárdsági értékei, valamint megnöttek a húzórugalmassági modulus értékek, ennek következtében a kompozitok ridegebbé és gyengébbé váltak, mint a töltetlen alapanyag. A hővezetési tényezőben javulás érhető el, ha egyéb szálal töltőanyag mellé adalékoljuk, mivel kapcsolatot teremt a szálak között. A grafén esetén már kis töltőanyagtartalom mellett is jelentősen lecsökkennek a szilárdsági értékek. A talkumnak és a bór-nitridnek a hatása nagyjából egy tartományba esik, azonban a talkum hatása erőteljesebb. A mechanikai tulajdonságokat figyelembe véve elmondható, hogy a hővezetés javítására célszerű bór-nitrid töltésű kompozitokat használni.

A mechanikai tulajdonságok vizsgálata után a hővezetési tulajdonságok alakulását elemeztem bór-nitrid és grafén töltőanyag használata esetén. A mérések alapján elmondható, hogy 20% talkum alkalmazása esetén is majdnem a kétszeresére nő a kompozit hővezetési tényezője a töltetlen rendszerhez képest, amihez 0,24 W/mK érték tartozik. Bór-nitrid használata esetén ez az érték még tovább javítható, körülbelül 0,86 W/mK értékig. A mérések alapján kijelenthető, hogy a keverők alkalmazásának hatása nem szignifikáns, a mérési eredmények egyértelmű tendenciát nem mutatnak.

5.2. Javaslatok, eredmények összefoglalása

A dolgozat tanulságaként leszűrhető, hogy a statikus keverők kiválasztása egy adott termék gyártásához komplex feladat. A legfőbb szempontok a keverő kiválasztásánál a rajta fellépő nyomásesés és a keverő homogenizáló képessége. Az egyik a gyártás költségeivel van szoros kapcsolatban, míg a másik a termék minőségével. A bór-nitrid töltőanyag használatával jobb hővezetési értékeket érhetünk el, mint talkummal vagy grafénnel és a mechanikai tulajdonságok is kevésbé csökkennek. A keverőelemek alkalmazása nem célravezető, mivel hatásuk elhanyagolható és növelik a befröccsöntéshez szükséges nyomásigényt, aminek tömeggyártás esetén jelentős költségvonzatai vannak.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Dunai A., Macskási L.: Műanyagok fröccsöntése, Lexica Kft., Budapest (2003).
2. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest (2000).
3. Búzás Lajosné.: A fröccsöntés helyzete Magyarországon 2013-ban, Műanyag és Gumi, 51/9, 321-326 (2014).
4. J. Murphy: Additives for Plastics Handbook, Elsevier Science Ltd., Oxford (2001).
5. R. D. Deanin: Additives in Plastics, Environmental Health Perspectives, 11, 35-39 (1975).
6. Wypych G.: Handbook of fillers: physical properties of fillers and filled materials. ChemTec Publishing, Toronto, 2000.
7. Han Z., Fina A.: Thermal conductivity of carbonnanotubes and their polymer nanocomposites: A review. Progress in Polymer Science, 36, 914-944 (2011).
8. Bodor G., Vas L. M.: A szén kristályos formái: gyémánt és grafit, Polimer anyagszerkezetan, Műegyetemi Kiadó, Budapest (2005).
9. P. Hugh O.: Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes: propertie, processing, and applications, Noyes Publications, New Jersey, (1993)
10. Kuilla T., Bhadrab S., Yaa D., Kimc N. H., Bosed S., Lee J. H.: Recent advances in graphene based polymer composites. Progress in Polymer Science, 35, 1350-1375 (2010).
11. V. Singh, D. Joung, L. Zhai, S. Das, S. I. Khondaker, S. Seal: Graphene based materials: Past, present and future, Progress in Materials Science, 56, 1178-1271 (2011)
12. Coleman J. N., Khan U., Blau W. J., Gun'ko Y. K.: Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites, Carbon 44, 1624-1652 (2006)
13. E. T. Thostenson, Z. Ren, T-W. Chou: Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review, Composite Science and Technology, 61, 1899-1912, (2001)
14. Kuilla T., Bhadrab S., Yaa D., Kimc N. H., Bosed S., Lee J. H.: Recent advances in graphene based polymer composites. Progress in Polymer Science, 35, 1350-1375 (2010)
15. M. I. Petrescu, M. G. Balint: Structure and properties modifications in boron nitride, U.P.B. Sci. Bull, Series B, 69/1, (2007)

16. Mondo Minerals B.V.: Talc in Plastics, Technical Bulletin 1301, Amsterdam, www.mondominerals.com/uploads/media/mondo_bulletin_plastics.pdf (2014.11.05.)
17. F. W. Billmeyer, M. Saltzman: Principles of Color Technology, John Wiley & Sons Inc., New York 1981
18. Kovács S.: Színrendszerek, NSZFI 0972-06 modul (Képfeldolgozás), Azonosító szám: SzT-005-05.
19. Hunter Lab: Application note, Vol.8 , No.9, 2008, page 1.
20. A. Müller: Coloring of Plastics, Carl Hanser Verlag, Munich (2003).
21. <http://www.biomastertechnology.com/> (2014.12.15)
22. Kalaitzidou K., Fukushima H., Drzal L. T.: A new compounding method for exfoliated graphite-polypropylene nanocomposites with enhanced flexural properties and lower percolation threshold. Composites Science and Technology, 67, 2045-2051 (2007).
23. Dr. Bánhegyi Gy.: Ömledék homogenitásának javítási lehetőségei fröccsöntésnél és extrúziónál, Műanyagipari szemle, 6/4 (2008).
24. C. Rauwendaal: Polymer Mixing: A Self-Study Guide, Carl Hanser Verlag, Munich (1998)
25. 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)
26. 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)
27. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest (2000)
28. Dunai A., Macskási L.: Műanyagok fröccsöntése, Lexica Kft., Budapest, (2003)
29. P. K. Kennedy: Practical and Scientific Aspects of Injection Molding Simulation, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven (2008)
30. Kovács J. G., Fröccsöntött termékek tervezése és szimulációja, Phd dissertation (2007)
31. Lajos Tamás.:Az áramlástan alapjai, Egyetemi tankönyv, Budapest (2008)
32. 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
33. Török D., Dr. Kovács J. G., Zsíros L.: Különböző elemszámú és átmérőjű StaMixCo statikus keverők vizsgálata, Műanyag és Gumi, 51/9, 346-351 (2014).

34. Suplicz A., Szabó F., Kovács József G.: Anyagvizsgálati módszerek fejlesztése fröccsöntési alkalmazásához, Műanyag- és Gumiipari Évkönyv, 114- 121 (2003)
35. Zsíros L., Suplicz A., Romhány G., Tábi T., Kovács J. G.: Development of a novel color inhomogeneity test method for injection molded parts, Polymer testing, 37, 112-116 2014

7. SUMMARY

In the literary part of my thesis, information was gathered about the coloring technologies of polymers, additives that are used in injection molding. The mixing of materials connected to the injection molding process was studied. Different mixing elements were investigated and also information was collected about the simulation of injection molding. Fundamentals of colors were also studied in detail.

In my work I focused on the analysis of SMN static mixing device produced by StaMixCo with different geometry and different number of mixing elements. In the work measurements were made on the injection molding machine during which the pressure needs of the injection molding process were examined and simulations were also made to calculate the pressure curves. The increasing in pressure needs were calculated and the different mixing devices were compared each other. The effect of the inner diameter and the number of the mixing elements were studied. The mixing efficiency of the different mixing devices were also examined. First the picture analyzer software developed at Department of Polymer Engineering was calibrated. Specimens were produced with different types of masterbatches and with different technological settings and their color inhomogeneity was evaluated used by the software and the grades of inhomogeneity were ranked by professional crew. The grades of the software and the crew were compared and the correlation between the grades were analyzed. The grades of software were modified with mathematical functions for the purpose of approaching the human scores. After that the mixing efficiency of the mixing devices were calculated with the help of the software. The conclusion of the measurements was that the static mixing devices with smaller diameter have better ability of color homogenization but their pressure needs are higher than the mixing devices with larger diameter. The effect of mixing elements is significant. The more mixing elements were used the more color homogeneity were reached but the connection between the number of mixing elements and the color inhomogeneity is not linear. The first mixing element has the highest effect on the color homogeneity improvement. That is the reason that using too many mixing elements is not practical.

In my thesis the effect of additives which increase the thermal conductivity of polymers was studied. Specimens were produced with different types and amount of additives and the mixing of these additives were attained with different types of mixing devices. The effect of static and dynamic mixing devices was analyzed and the change of mechanical and thermal properties of specimens was investigated. As result of the measurement it was pointed out that the effect of mixing devices on the thermal and mechanical properties is not significant. The thermal properties were slightly better if dynamic mixing devices were used.