



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

MESTERKEVERÉKKEL SZÍNEZETT, FRÖCCSÖNTÖTT
TERMÉKEK SZÍNEGYENETLENSÉGÉNEK VIZSGÁLATA

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZET

KÉSZÍTETTE:

ZSÍROS LÁSZLÓ

OKLEVELES VEGYÉSZMÉRNÖK

TÉMAVEZETŐ:

DR. KOVÁCS JÓZSEF GÁBOR

2019

A doktori disszertáció bírálata és a védésről készült jegyzőkönyv a
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Karának Dékáni Hivatalában megtekinthető

1. Bevezetés

Napjainkban a két legfontosabb műanyagfeldolgozási technológia az extrúzió és a fröccsöntés. Ha a feldolgozott alapanyag mennyiség szempontjából tekintünk rájuk, akkor a két technológia nagyon közel áll egymáshoz, de ha figyelembe vesszük a termékek számát, akkor a fröccsöntéssel előállított termékek jóval meghaladják az extrúzióval előállítottakét. Ez azért van, mert a fröccsöntött termékek kialakítás szempontjából sokkal változatosabbak, mint az extrudált termékek. A fröccsöntéssel gyártott termékek folyamatosan növekvő felhasználása nagyon magas minőségi követelményeket támaszt esztétikai és mechanikai szempontból is. Ha színes fröccsöntött termékek gyártása a feladat, akkor három lehetőség közül választhatunk.

Az első, hogy egy előzőleg megszínezett anyagot használunk, amit előszínezett anyagnak neveznek, és amelyben az anyagot egy a fröccsöntést megelőző technológiai lépésben, a kompaundálás során színezzük meg, így a fröccsöntés során már semmit sem kell a polimerhez keverni. Ebben az esetben a fröccsöntés során felhasznált anyag és a késztermék színe teljesen megegyezik, és a termékek színegyenletessége nagyon jó. Azokban az esetekben, amikor a termékkel szemben nagyon magas minőségi követelményeket támasztanak funkcionális, esztétikai és biztonsági szempontból, ezt az opciót szokták választani. Ez a megoldás a feldolgozás szempontjából is nagyon kényelmes, mivel ez a színezési technológia nem igényel kiegészítő berendezéseket vagy a fröccsöntőgépek módosítását a fröccsöntő üzemben, így tehát ebben az esetben a fröccsöntő üzem beruházási költsége viszonylag alacsony lesz, és nem lesz szükség magasan képzett, tapasztalt munkaerőre az üzemben, ellenben nagy hátránya, hogy az alapanyag költségek jóval magasabbak (kb. 20-70%) lesznek a natúr alapanyagból és mesterkeverékből történő gyártáshoz képest.

A másik lehetőség, hogy az alapanyagot mesterkeverékkel színezzük. Ebben az esetben a natúr alapanyag színezése a fröccsöntő gépben a mesterkeverék szemcséinek hatására megy végbe. A mesterkeveréket alkotó két legfontosabb komponens a hordozó és a színező anyagok, úgymint a festékek és a pigmentek, amelyek kis molekulájú szerves vagy szervetlen anyagok. Ha a gyártás költségérzékeny, akkor ezt a megoldást választják. Összességében a gyártó cégek 90%-a használ mesterkeverékeket a natúr alapanyag színezéséhez, hiszen az alapanyag költség így jelentősen csökkenthető. Ebben az esetben egy új üzem beruházási költsége lényegesen magasabb lesz, de a kiegészítő berendezések költségének megtérülési ideje (ROI) nagyon rövid lesz, ha az üzem folyamatosan működik. A gyárnak magasabban képzett és tapasztaltabb munkavállalókra lesz szüksége ahhoz, hogy képesek legyenek kezelni a technológiai kihívásokat, de ez költség szempontjából nem jelentős, mivel egy fröccsöntött termék teljes

gyártási költségében a munkaerő költsége általában kevesebb, mint 10%. Ennélfogva a munkaerő egy 10-20%-os költségtöbblete csupán 1-2% növekedést okoz a teljes gyártási költségben, ami lényegesen kisebb, mint az előszínezett anyag által okozott költségtöbblet. Ez azonban legtöbbször azt eredményezi, hogy a termékeken néha megjelennek színegyenetlenségek, amelyek szabad szemmel is észrevehetőek. Bizonyos színek és polimerek esetén nagyóriási kihívást jelenthet a gyárnak a folyamatos, jó minőségű termékek gyártása.

A harmadik opcióban a natúr alapanyag szintén a fröccsöntő gépben nyeri el a színét, de a színező anyag szilárd mesterkeverék szemcsék helyett egy folyadék. Ez a folyadék szintén egy hordozóból (ami szintén folyadék ebben az esetben, úgymint ásványi olaj, PIB, folyékony csúsztató) és különböző színező pigmentekből és festékekből áll. Ezt a technológiát többnyire akkor alkalmazzák, ha csak kis mennyiségű anyagokat kell megszínezni, ekkor ugyanis a mesterkeverékeket nem lehet gazdaságos módon alkalmazni.

Az alapján a tény alapján, hogy a legtöbb fröccsöntött terméket különböző mesterkeverékekkel színezik, ez a munka ennek a színezési technikának a kihívásaira fókuszál. A technológiai változások kiértékeléséhez, úgymint a különböző keverőelemek alkalmazása vagy a technológiai paraméterek változása, szükséges egy olyan mérő rendszer, amely kellően precíz, jó ismétlőképességgel és reprodukálhatósággal rendelkezik. Ilyen mérő rendszer korábban nem létezett, ezért ennek a munkának a legelső és legfontosabb lépése egy ilyen mérő rendszer megalkotása és validálása volt. Ezzel a rendszerrel a mesterkeverékeket és a mesterkeveréket használó színezési technológiát vizsgáltam különböző aspektusokból.

2. Az irodalom áttekintése és kritikai analízise

Korábban a színhomogenitást szemrevételezéssel értékelte egy szakértőkből álló csoport úgy, hogy pontozta a mintákat, tipikusan egy 1-től 10-ig terjedő skálán, de ennek a módszernek számos hátránya van: a mérés reprodukálhatósága bizonytalan, és a mérésnek magas a szórása, ami megakadályozza azt, hogy eldöntsük, hogy az átlagérték változása szignifikáns-e. Ez a mérési módszer alkalmatlan arra, hogy megmutassa a legtöbb keverő berendezés közti különbségeket. Ennélfogva világos, hogy létre kell hozni egy automatizált mérési módszert, ami összhangban van az emberi értékelésekkel, de jobb ismétlhetősége és kisebb szórása van. Az automatizált méréseknek van még egy előnye az emberi értékelésekkel szemben: maga a mérés sokkal kevesebb időt igényel.

Az irodalmi áttekintés alapján ki lehet jelenteni, hogy egy automatizált mérő rendszer, amely jelentősen kisebb szórással dolgozik, egy előrelépést jelentene ezen a területen, és

lehetővé tenné olyan jelenségek vizsgálatát, amelyeket az emberi értékelésekkel nem lehetett. Egy ilyen rendszer birtokában homogenizációs tesztek lehetne végezni különböző keverő eszközökkel, ami jelenleg hiányzik az irodalomból. Bár létezik néhány numerikus analízis statikus keverőkre, de dinamikus keverők esetében egyáltalán nincsenek ilyenek sem az extrém bonyolultságuk miatt. Továbbá tisztázni lehetne a fröccsöntési paraméterek hatását, mert egymásnak ellentmondó megállapításokat lehet találni. Egy a mesterkeverékekre vonatkozó standardizált színegyenetlenség mérésével becsülni lehetne egy adott fröccsöntő rendszer által gyártott termékek színegyenetlenségét. Ez egy határozott előrelépés lenne a fröccsöntőgépek keverési hatékonyságának tervezésében, továbbá a mesterkeverék receptúrák fejlesztésében és a szerszámkialakítás hatását is fel lehetne térképezni ezzel az új objektív mérési módszerrel.

Ismerve ennek a területnek a tudományos háttérét, a disszertációmban az alábbi célokat fogalmaztam meg:

- egy mérési módszer kifejlesztése, amely egy standardként használható a kvantitatív mérésekhez és a különböző eszközök és paraméterek színegyenetlenségre gyakorolt hatásának összevetéséhez fröccsöntött termékek esetében,
- statikus és dinamikus keverők kvantitatív összehasonlítása fröccsöntött termékek színegyenetlenségére gyakorolt hatása alapján,
- a feldolgozási paraméterek színegyenetlenségre gyakorolt hatásának mérése fröccsöntött termékek estén,
- statikus keverők átmérőjének és elemszámának analízise a fröccsöntött termékek színegyenetlenségre gyakorolt hatás szempontjából,
- mesterkeverék receptúrák jellemzése a homogenizációs tulajdonságaik alapján,
- a szerszámkialakítás elemzése az érzékelt színegyenetlenségre gyakorolt hatása alapján.

3. Felhasznált anyagok és gépek

A következő fejezetekben a munkám során felhasznált és alkalmazott eszközöket, anyagokat és mérési módszereket mutatom be.

3.1. Fröccsöntéshez használt anyagok

Az összes vizsgálat ABS Terluran GP35 alapanyaggal lett elvégezve. A felhasznált és tesztelt mesterkeverékek két nagy csoportba sorolhatók: a kereskedelmi forgalomban kapható, és a speciálisan a tesztekhez gyártott mesterkeverékek. Általánosságban kijelenthető, hogy

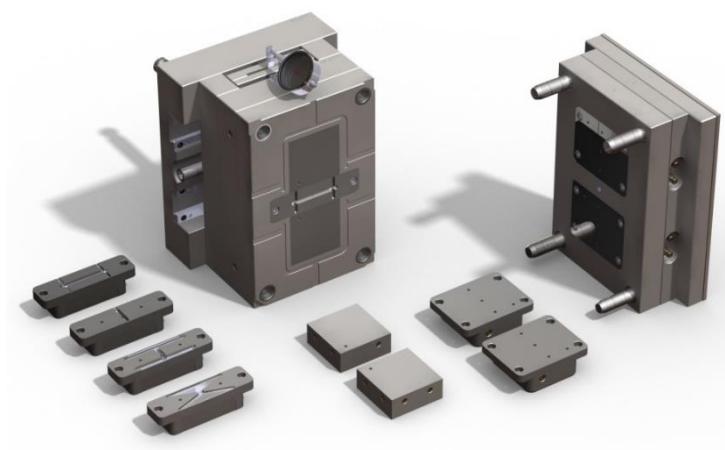
mindegyik mesterkeverék ABS hordozóval készült a három vezető mesterkeverékgyártó, vagyis a Clariant, a PolyOne és az A. Schulman valamelyike által. A specifikusan a tesztekhez gyártott mesterkeverékekben felhasznált színezőanyagok az 1. táblázatban láthatóak. A mesterkeverék összetételére vonatkozó vizsgálatok a fent említett cégek képviselőivel együtt lettek összeállítva.

| Minta száma | Név | Alapanyag | Gyártó |
|-------------|------------|---|------------|
| 1 | Red dye | Macrolex Red EG – CI Solvent Red 135 – perinone | Lanxess |
| 2 | Red O | Cinilex DPP Red SR2P – CI Solvent Red 254 – diketopyrrolopyrrole | Cinic |
| 3 | Red Mono 1 | In-house produced by the manufacturer | A Schulman |
| 4 | Red Mono 2 | Microlen Red 2030-MC – CI Solvent Red 254 – diketopyrrolopyrrole | BASF |
| 5 | Red IO | Bayferrox 130 – CI Pigment Red 101 – iron oxide | Bayer |
| 6 | Blue dye | Keyplast Blue FR – CI Solvent Blue 104 - anthraquinone | Keystone |
| 7 | Blue O | Heliogen K 6902 – CI Pigment Blue 15:1 – copper phthalocyanine | BASF |
| 8 | Blue Mono | Eupolen PE Blue 69-2001- CI Pigment Blue 15:1 – copper phthalocyanine | BASF |
| 9 | Blue IO | NI-12 UM Blue – CI Pigment Blue 29 – Ultramarine blue | Nubiola |

1. táblázat A specifikusan a tesztekhez gyártott mesterkeverékben felhasznált színezőanyagok

3.2. Szerszám és gép

Egy speciális fröccsöntő szerszám lett kialakítva a mérések elvégzéséhez. A fröccsöntő szerszám különböző falvastagságú 80 x 80 mm-es lapka próbatestek gyártására alkalmas. A fészkek betétei cserélhetőek a különböző felületi érdességek kialakításához, és a betétes kialakítású gát szintén cserélhető a különböző gát típusok hatásának vizsgálata céljából, úgymint a tűgát, a filmgát, a több beömlésű tűgát, és egy módosított filmgát. A fröccsöntő szerszámot és a betéteit 1. ábra mutatja.



1. ábra A tesztekhez használt fröccsöntő szerszám a cserélhető betétekkel

Az Arburg Allrounder Advance 370S 700-290 típusú (csiga átmérő 30 mm) fröccsöntőgépet használtam a tesztekhez. A tesztek során alkalmazott fröccsöntési paraméterek a 2. táblázatban láthatóak. Azokban a teszt sorozatokban, amelyekben a fröccsöntési paraméterek hatását vizsgáltam, a fröccsöntési sebesség, a szünetidő és a hengerhőmérséklet lett megváltoztatva a 2. táblázatban megjelölt értékhez képest egy kisebb és egy nagyobb értékre.

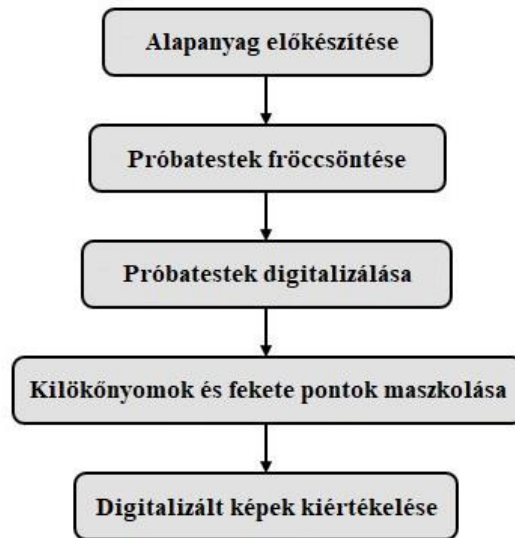
| Fröccsöntési paraméter | Érték |
|--|-------------|
| Térfogat [cm ³] | 50 |
| Fröccsöntési sebesség [cm ³ /s] | 55 |
| Fröccsöntési nyomás [bar] | változó |
| Átkapcsolási pont [cm ³] | változtatva |
| Utónyomás [bar] | 600 |
| Utónyomási idő [s] | 6 |
| Maradék hűtési idő [s] | 11 |
| Szünet idő [s] | 0 |
| Csiga forgási sebesség [m/min] | 25 |
| Torlónyomás [bar] | 60 |
| Dekompressziós térfogat [cm ³] | 6 |
| Dekompressziós sebesség [cm ³ /s] | 20 |
| Henger hőmérséklet [°C] | 225 |
| Szerszám hőmérséklet [°C] | 40 |
| Ciklus idő [s] | 22,6 |

2. táblázat Fröccsöntési paraméterek

3.3. Mérési módszer

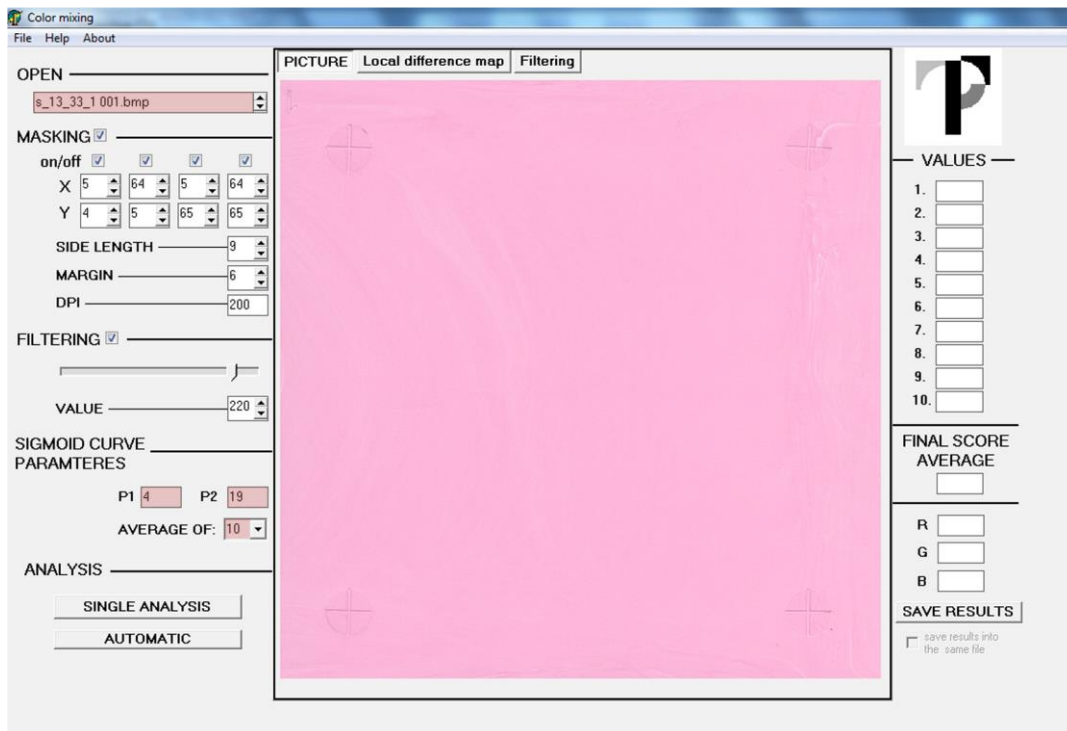
A mérési módszer egyes lépéseit a 2. ábra illusztrálja. Az előkészítési lépésben az alapanyag meg lett szárítva, és az adott mesterkeverékkel az előírt arányban (4% az esetek többségében) be lett keverve. A próbatestek a 3.2 fejezetben ismertetett fröccsöntő géppel, szerszámmal és paraméterekkel le lettek gyártva. A minták digitalizálása egy HP Scanjet G4010 és egy EPSON Perfection V 600 Photo síkágvas lapszkennel segítségével történt. A próbatestek 200 DPI felbontással lettek beszkenelve. Alacsonyabb felbontással a képek nem voltak kellő pontosságúak, míg magasabb felbontással a képek ugyanolyan eredményeket adtak, viszont a számítási idő jelentősen növekedett. A mérések során igazolva lett, hogy megfelelő kalibrálással mindkét szkennel egymással összevethető eredményeket tudott produkálni. A nyers, digitalizált képek igényeltek bizonyos előkészítést mielőtt az algoritmus kiértékelte volna azokat, mivel a mintákon kilökő nyomok és fekete pontok is találhatóak voltak, melyek hamis eredményre vezettek volna, és nem képezték a vizsgálat sorozatok tárgyát. A digitalizált képek előkészítése után egy speciális, saját fejlesztésű algoritmus értékelte a mintákat. Az algoritmus először átkonvertálja az RGB színrendszerben rögzített képeket a CIELAB

színrendszerbe. Erre azért van szükség, mert így lehet jó korrelációt elérni az emberi értékelésekkel. A kiértékelő szoftver első generációját a 3. ábra mutatja.

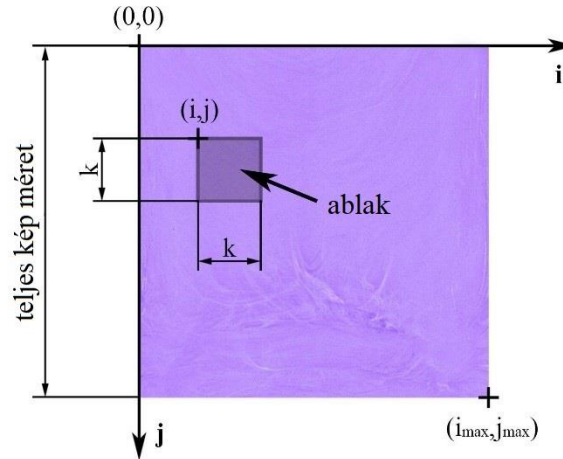


2. ábra A mérési módszer folyamatábrája

A képpontok számított Lab értékeit felhasználva egy mozgó ablak pásztázza végig a képet, és az ablak minden (i, j) pozíciójában kiszámítja az átlagos színkoordinátákat $(\bar{a}_{i,j,k})$, ahol k az ablak mérete (4. ábra).



3. ábra Az első generációs kiértékelő szoftver



4. ábra A mozgó ablak a képen

Az ablakméret (k) 1-től a képméret maximumáig változhat. Az átlagos színekoordinátákból egy A mátrixot generálhatunk a következő képpen (Eq. 1-3):

$$\bar{A}_{i,j,1} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{0,0,1} & \bar{a}_{1,0,1} & \cdots & \bar{a}_{i,0,1} \\ \bar{a}_{0,1,1} & \bar{a}_{1,1,1} & & \bar{a}_{i,1,1} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \bar{a}_{0,j,1} & \bar{a}_{1,j,1} & \cdots & \bar{a}_{i,j,1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\bar{A}_{i,j,2} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{0,0,2} & \bar{a}_{1,0,2} & \cdots & \bar{a}_{i-1,0,2} & n.a. \\ \bar{a}_{0,1,2} & \bar{a}_{1,1,2} & & \bar{a}_{i-1,1,2} & n.a. \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \bar{a}_{0,j-1,2} & \bar{a}_{1,j-1,2} & & \bar{a}_{i-1,j-1,2} & n.a. \\ n.a. & n.a. & \cdots & n.a. & n.a. \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\bar{A}_{i,j,k} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{0,0,k} & n.a. & \cdots & n.a. \\ n.a. & n.a. & & n.a. \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ n.a. & n.a. & \cdots & n.a. \end{bmatrix}, \quad (3)$$

ahol a mátrix elemeit a következő képpen számíthatjuk ki (Eq. 4):

$$\bar{a}_{i,j,k} = \frac{\sum_{x=i}^{i+k-1} \sum_{y=j}^{j+k-1} P[L,a,b](x,y)}{k^2}, \quad (4)$$

ahol i és j a mozgó ablak pozíciója a teljes képen belül, k az ablak szélessége és magassága, és x és y a mozgó ablakon belüli helyi koordináták.

Minden ablakméretre és pozícióra a mozgó ablakon belüli képpontoknak az átlagos színekoordinátáktól ($\bar{a}_{i,j,k}$) számított euklideszi távolsága ki lett számítva. Minden ablak esetében az átlagos euklideszi távolság az Eq. (5) összefüggés szerint lett kalkulálva.

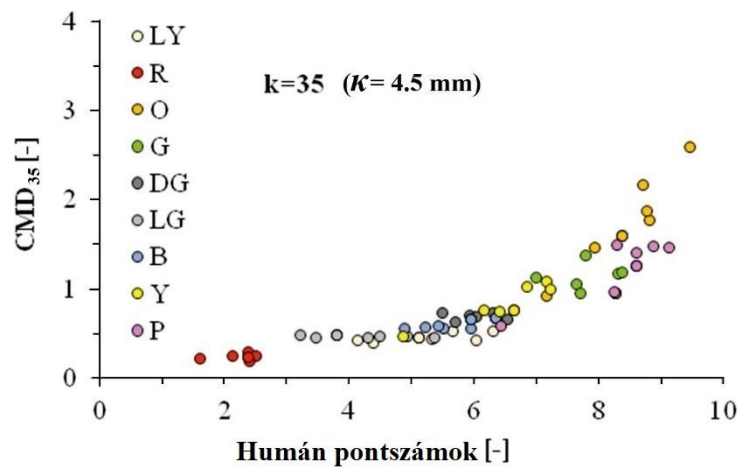
$$MD_{i,j,k} = \frac{\sum_{x=i}^{i+k-1} \sum_{y=j}^{j+k-1} \sqrt{\sum_{\varepsilon=L,a,b} \{P[\varepsilon](x,y) - A[\varepsilon](x,y)\}^2}}{k^2}. \quad (5)$$

Az Lab színtérben két szín távolsága független a referencia fehértől, így azt nem volt szükséges megmérni. Habár ezeket a számításokat el lehet végezni $k = 1$ esetében, ennek gyakorlati jelentősége nincsen, hiszen ekkor a kalkulált $MD_{i,j,k}$ értékek nullával lesznek egyenlők. $k \geq 2$ értékek esetén az $MD_{i,j,k}$ értékek minél kisebbek, annál egyenletesebb színű a minta a mozgó ablak által lefedett területen. Az ablak pixelről pixelre történő mozgatásával a szoftver megtalálja a legmagasabb MD_k értéket, melyet HMD_k -val jelöltem. Ha a mozgó ablak mérete megegyezik a teljes kép pixeleinek számával, akkor egy globális MD (GMD) értéket kapunk. A szoftver által a különböző ablakméretekre számított HMD_k értékek összevethetők az emberi értékelésekkel.

Az emberi értékelésekhez 6 színértékeléssel foglalkozó technikus lett felkérve, hogy értékeljék a minták színegyenetlenségét, melyet az általunk fejlesztett szoftver kalibrálásához lett felhasználva. Közülük három Magyarországon, három pedig Dániában dolgozott egy nemzetközi fröccsönt cégnél színspecialista vagy minőségbiztosítási technikus munkakörökben, és mindegyiküknek legalább 2 éves tapasztalata volt a területen. Három nő és három férfi volt köztük. A munkájuk részeként a tesztleveleinkben szereplő mintákhoz hasonló alakú, anyagú, és méretű fröccsöntött termékek vizuális ellenőrzését végezték különös tekintettel a termékek színhomogenitására. A tesztleveleket a cég laboratóriumában végezték, ahol a mintákat egy SpectraLight QC színkabinban, D65 megvilágítás mellett, kb. 30–40 cm távolságból, a felületre merőleges megfigyelési pozícióból vizsgálták meg. A pontozáshoz a technikusok azt az instrukciót kapták, hogy a mintákat 0-tól 10-ig értékeljék, ahol a 0 a teljesen homogén mintát jelenti, a 10 pedig az extrém inhomogén mintát. Ezek alapján az instrukciók alapján a technikusok a csíkozódástól mentes mintákat hibátlannak (0 pont) ítélték, míg az erős csíkozódást mutatóknak, melyek minden mérték szerint elfogadhatatlanok voltak, 10 pontot adtak.

Az előszínezett anyagból készült referencia minták egy kicsi, ám következetes színegyenetlenséget mutattak, amely a szkennelésből származott. Ezek a kis inhomogenitás értékek az előszínezett anyagból készült minták esetén a különböző színárnyalatokkal változtak. Ezek az értékek jól korreláltak a mesterkeverékekkel készült minták esetén a teljes képméretnél számított (GMD) értékekkel. Ennélfogva a HMD értékeket korrigáltam a GMD értékekkel, hogy a különböző színű minták inhomogenitás értékei összehasonlíthatók legyenek. Ha ábrázoljuk a korrigált szoftver pontszámokat ($CMD = HMD - GMD$) az emberi értékelések függvényében (5. ábra), akkor azt lehet látni, hogy egy elég jó korreláció van az értékek között,

de az nem lineáris. Az 5. ábra CMD értékei 35 pixeles ablakméretre lettek kiszámolva, mivel a korreláció ennél az ablakméretnél volt maximális ($R=0.86$).

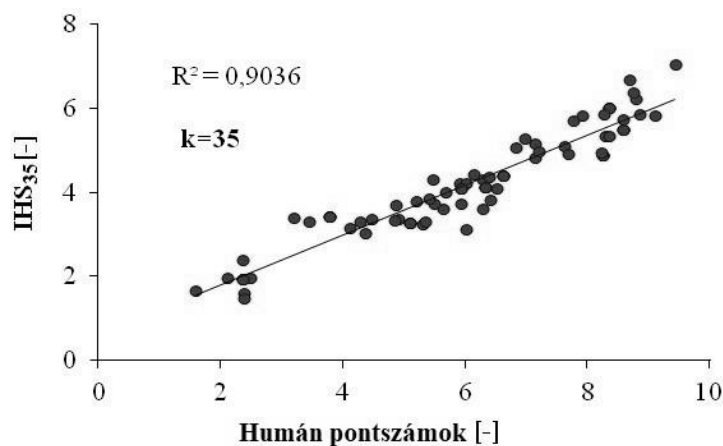


5. ábra A korrigált szoftver pontszámok (CMD) minden szín esetében a humán pontszámok függvényében

Mivel a Weber-Fechner törvény szerint általánosságban az emberi érzékelés az inger logaritmusával arányos, a CMD értékeket logaritmikusan transzformáltam. A $\log(\text{CMD})$ értékek 34-35 pixel környékén mutattak maximális korrelációt $R=0.95$ lineáris korrelációs koefficiens érték mellett. A 6. ábra az IHS értéket mutatja (inhomogenitás érték), amely egy lineáris transzformációja a logaritmikus korrigált értékeknek, az emberi értékelések függvényében. Ezt a lineáris transzformációt mutatja az Eq. 6. egyenlet.

$$IHS = C_1(\log(\text{CMD}) + C_2). \quad (6)$$

A C_1 and C_2 konstansok nincsenek hatással a korrelációs értékekre. Ezeknek a konstansoknak a célja csupán az, hogy az IHS értékeket az emberi értékelésnek megfelelő skálára transzformálja.



6. ábra Az emberi értékelések és a korrigált szoftveres pontszámok logaritmusának korrelációja 35 pixeles ablakméret esetén

4. Összefoglalás

Kifejlesztettem egy új mérési eljárást a színegyenetlenség objektív kiértékelésére. The measurement method was performed as follows: 80 x 80 mm injection molded test specimens were produced from ABS GP 35 mixed with various solid phase masterbatches. A mintadarabok egy síkágys lapszkennerrel lettek digitalizálva, és az így készült képek egy szoftver segítségével lettek kiértékelve. A szoftver egy saját fejlesztésű algoritmus alapján működik. Pixelről pixelre végig pásztázza a képet egy előre meghatározott ablakmérettel, és kiszámítja az ablakon belüli pixelek euklideszi távolságát. Amikor a teljes kép végig van pásztázva, akkor a minta színegyenetlenségét a pásztázás során számított legmagasabb átlagos euklideszi távolságból számítja ki az algoritmus. Továbbá kiszámításra kerül az átlagos euklideszi távolság a teljes képre is. Míg a meghatározott ablakméretből származó érték az inhomogenitásra, addig a teljes képből származó érték a vizsgált színárnyalatra jellemző, és ahhoz szükséges, hogy a korrigáljuk vele az inhomogenitás értéket, hogy a különböző színárnyalatú mesterkeverékek színegyenetlenségének mértéke összehasonlíthatóvá váljon. érté. Megmértem minta sorozatokat különböző ablakmérettel, és különféle inhomogenitás értékek kerültek kiszámításra korrekcióval és anélkül, illetve logaritmikus transzformációval is. Az eredményeket korreláltattam az emberi kiértékelésekkel, és azt tapasztaltam, hogy a korreláció akkor lett a legmagasabb, ha az eredményeket korrigáltam a teljes képre számított értékekkel, és az így korrigált értékeket logaritmikusan transzformáltam. A korreláció maximális értéke 95 % feletti volt 35 pixeles ablakméret esetén (200 DPI, $\kappa = 4.5$ mm).

Ennek a módszernek a segítségével különböző fröccsöntési paramétereknek, vagyis a fröccsöntési sebességnek, a henger hőmérsékletnek és az alapanyag hengerben töltött tartózkodási idejének a színhomogenitásra gyakorolt hatását értékeltem. Igazoltam, hogy a fröccsöntési sebesség növelése csökkenti, míg a henger hőmérséklet növelése növeli a mért színegyenetlenséget TiO_2 -t és festéket tartalmazó mesterkeverékekben. Azt is igazoltam, hogy az alapanyagnak a hengerben töltött tartózkodási ideje nem befolyásolja szignifikánsan a színegyenetlenséget.

Megmértem különböző statikus és dinamikus keverő eszközök keverési hatékonyságát, és megmutattam, hogy szignifikáns különbségek vannak a homogenizáló képességeik között. Igazoltam, hogy a szilárd fázisú mesterkeverékekkel színezett polimerek esetében a numerikus módszerekkel számított keverési hatékonyságok hibás következtetésekre vezetnek, mivel képesek nem veszik figyelembe a különböző keverők diszperzív keverési hatékonyságát. Megmértem több különböző átmérőjű és elemszámú StaMixCo statikus keverő hatását, és arra

a következtetésre jutottam, hogy a statikus keverők keverési hatékonysága függ az átmérőtől, ami ellentétben áll az irodalomban található numerikus módszerek eredményeivel. Objektív módon megmértem és összehasonlítottam a dinamikus keverők és a statikus keverők keverési hatékonyságát, ami numerikus módszerekkel nem lehetséges az extrém bonyolultságuk miatt. Megmutattam, hogy a peremfeltételek ismeretében az alkalmazott statikus keverő elemszáma és átmérője optimalizálható a maximális keverő képességre nézve. Ugyanez a mérési módszer alkalmazható különböző tervezésű dinamikus keverőkre, hogy meghatározzuk, hogy mely kialakítások mennyire fontosak a homogenizáció szempontjából.

Megmutattam, hogy a különböző összetételű mesterkeverékeknek jelentős hatása van a fröccsöntött termékek színegyenetlenségére. Megmértem kilenc különböző mesterkeverék homogenizálódó képességét és megmutattam, hogy ezen mesterkeverékek minősíthetők ezzel a mérési módszerrel, ami jelentősen javítja a jobb homogenizálódó képességű mesterkeverékek fejlesztési lehetőségeit. A különböző mesterkeverék receptúrák mérési eredményeiből az a következtetés vonható le, hogy a színegyenetlenséget elsődlegesen a komponensek közötti kölcsönhatások okozzák, és nem pedig a különálló komponensek tulajdonságai. Következésképpen jobb színegyenetlenséget tapasztaltam az organikus pigmenteket tartalmazó mesterkeverékeknel. Továbbá azt tapasztaltam, hogy a nagyobb mennyiségben alkalmazott felületkezelő szer szignifikánsan javította ezeknek az organikus pigmenteket tartalmazó mesterkeverékeknek a színegyenetlenségét.

Méréseim azt mutatták, hogy a szerszámkialakításnak és a termék felületi struktúrájának is jelentős hatása van az érzékelt színegyenetlenségre. Ezeket a hatásokat egy speciális fröccsöntő szerszámban mértem meg, amelynél betétek segítségével változtatni lehetett a gátkialakítást és a felületi érdességet. Általánosságban a kitöltés során nagyobb nyírást produkáló gátkialakítások javították a színhomogenitást, bár ennek a jelenségnek a hatását egyéb tényezők torzították. A különböző felületi érdességű betétekkel végzett mérések azt mutatták, hogy az érzékelt színegyenetlenség fordítottan arányos a felületi érdesség logaritmusával.

5. Tézisek

1. Tézis

Kifejlesztettem egy új mérési módszert a színegyenetlenség kvantitatív elemzésére. Igazoltam, hogy a mérési módszer, és az emberi kiértékelések eredményei több, mint 95%-os korrelációt mutatnak, és hogy az új mérési eljárás szórása egy nagyságrenddel kisebb, mint az

emberi kiértékelések szórása. Igazoltam továbbá, hogy a módszer szórása lényegesen kisebb a fröccsöntési folyamat szórásánál, ennél fogva alkalmas a fröccsöntés során lejátszódó, színegyenetlenségre hatással bíró folyamatok vizsgálatára. Vizsgálataimhoz véletlenszerűen kiválasztott, 6 képzett technikusból álló, 3 férfit és 3 nőt tartalmazó csoport eredményeit használtam. Méréseimet ABS, Styrolution Terluran® GP-35 alapanyagba kevert szilárd fázisú mesterkeverékekkel végeztem, amelyből a vizsgálatokhoz használt próbatesteket fröccsöntéssel állítottam elő. [1, 2, 8]

2. Tézis

Igazoltam, hogy az általam kifejlesztett mérési módszer alkalmas a fröccsöntésben alkalmazható statikus és dinamikus keverőelemek homogenizáló képességének kvantitatív mérésére és összehasonlítására, valamint a keverőelemek kialakításának optimalizálására. Méréseimet egy Arburg 370S 700-290 advance típusú, 30 mm-es csigaátmérőjű fröccsöntőgéppel, ABS, Styrolution Terluran® GP-35 alapanyagból és szilárd fázisú mesterkeverékekből gyártott próbatesteken végeztem el. [3, 4, 5, 8]

3. Tézis

Igazoltam, hogy a fröccsöntési paraméterek közül a fröccsöntési sebességnek és a hengerhőmérsékletnek van a színegyenetlenségre jelentős hatása TiO_2 -t és festéket tartalmazó mesterkeverékek esetén. Amíg a fröccsöntési sebesség növelése csökkenti, addig a hengerhőmérséklet növelése növeli a színegyenetlenséget, amely jelenség a fröccssebesség növelésnek és az hengerhőmérséklet csökkentésnek nyírásnövelő hatására vezethető vissza. Vizsgálataimat ABS, Styrolution Terluran® GP-35 alapanyagon, szilárd fázisú mesterkeverékekkel végeztem. [2, 8]

4. Tézis

Az általam kifejlesztett mérési módszerrel bizonyítottam, hogy a fröccsöntésben használatos statikus keverők homogenizáló képességét az alkalmazott elemszámon túl a statikus keverő átmérője is szignifikánsan befolyásolja, amely a különböző statikus keverőkben kialakuló eltérő nyírásviszonyokkal magyarázható. A fröccsöntés során alkalmazott statikus keverőknek a színegyenetlenségre gyakorolt hatása az alábbi összefüggéssel írható le: $\Delta IH = K \cdot n$, ahol ΔIH az inhomogenitás változás, K az egy elem hatása, amely függ az elem átmérőjétől és geometriai kialakításától, n pedig az elemek száma. Ennek segítségével a

kiindulási peremfeltételek ismeretében az adott keverőelemek alkalmazásával elérhető színegyenetlenség számítható és tervezhető. Rámutattam továbbá, hogy mérési módszeremmel a peremfeltételek ismeretében a statikus keverők átmérője és elemszáma optimalizálható. Méréseimet StaMixCo SMN típusú 5, 7, 8 elemes, 18, 22 és 27 mm átmérőjű statikus keverőkkel ABS, Styrolution Terluran® GP-35 alapanyagba kevert szilárd fázisú mesterkeverékekkel végeztem. [4, 8]

5. Tézis

- a.) Mérési módszeremmel igazoltam, hogy az egyes mesterkeverék receptúrák homogenizálódó képessége jelentősen különbözik, és ez mérési módszerem segítségével kvantitatív módon mérhető. Ez lehetővé teszi az egyes receptúrák összehasonlítását és minősítését azok homogenizálódó képessége alapján. [8, 9]
- b.) Igazoltam, hogy a szilárd fázisú mesterkeverékek homogenizálódó képessége elsősorban a mesterkeveréket alkotó komponensek kölcsönhatásától függ. Megmutattam továbbá, hogy a mesterkeveréket alkotó különálló komponensek homogenizálódó képességében tapasztalható különbségek nem magyarázzák meg a mesterkeverékek között tapasztalható különbségeket. [7, 8, 9]

6. Tézis

Kimutattam, hogy az érzékelt színegyenetlenség a felületi érdesség logaritmusával fordítottan arányos. Méréseimet egy cserélhető betétes szerszámon, különböző felületi érdességű betétek segítségével, ABS, Styrolution Terluran® GP-35 alapanyagból, szilárd fázisú mesterkeverékekkel fröccsöntött próbatesteken végeztem. [6,8]

6. Publikációk

1. **Zsíros L.**, Kovács J. G.: Measuring color inhomogeneity of injection molded parts. in 'Proceedings of OGÉT, Arad, Romania' 454-457 (2013).
2. **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).
3. **Zsíros L.**, Kovács J. G.: Fröccsöntőgépek homogenizáló képességének optimalizálása. *Műanyag és Gumi*, **50**, 347-350 (2013).

4. Török D., **Zsíros L.**, Kovács J. G.: Különböző elemszámú és átmérőjű StaMixCo statikus keverők vizsgálata. *Műanyag és Gumi*, **51**, 346-351 (2014).
5. **Zsíros L.**, Török D., Kovács J. G.: Development of a color inhomogeneity measurement method and its application to the evaluation of static mixers. in 'Proceedings of OGÉT, Csíksomlyó, Romania' 415-418 (2015).
6. Török D., **Zsíros L.**, Kovács J. G.: Effects of gate type and surface roughness of mold cavity on color homogeneity of injection molded parts. in 'Proceedings of OGÉT, Déva, Romania', (2016).
7. **Zsíros L.**, Török D., Kovács J. G.: The effect of masterbatch recipes on the homogenization properties of injection molded parts. *International Journal of Polymer Science*, **2017**, 1-7 (2017).
8. **Zsíros L.**, Kovács J. G.: Surface homogeneity of injection molded parts. *Periodica Polytechnica*, **62**(4), 284-291 (2018).
9. **Zsíros L.**, Török D., Kovács J. G.: Evaluation of the homogenization properties of masterbatches. *Coloration Technology*, **133**, 431-438 (2017).
10. Morten Hannemose, Jannik Boll Nielsen, **László Zsíros**, and Henrik Aanaes, An image-based method for objectively assessing injection moulded plastic quality. SCIA (2017).