

# Anyagtulajdonságok újszerű mérési lehetőségei

## Novel methods for material properties measurements

*SZABÓ Ferenc, SUPLICZ András, KOVÁCS József Gábor*

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechika Tanszék,  
H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., +36-1-463-1440,  
E-mail: szabof@pt.bme.hu, suplicz@pt.bme.hu, kovacs@pt.bme.hu

### Abstract

*In these days the injection molding simulation software get more and more attention in the plastic industry. The pressure-volume-temperature relationship is one of the most important input parameters of the injection molding simulation software. In this paper a new method is presented which uses an injection molding machine to determine the pvT data of the polymer melt.*

### Összefoglalás

*Napjainkban a fröccsöntés szimulációs szoftverek alkalmazására egyre nagyobb hangsúly helyeződik az iparban. A szimulációk egyik legfontosabb bemenő paramétere a felhasznált alapanyag nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat összefüggése. Munkánk során egy olyan új eljárást fejlesztettünk, amelynek segítségével polimer ömledékek fajtérfogata határozható meg fröccsöntőgép segítségével.*

### Kulcsszavak

Nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat, pvT adat, fröccsöntés, fröccsöntés szimuláció, mérés technika

## 1. BEVEZETÉS

Napjainkban a szimulációs szoftverek fejlesztési céljai egyértelműen a valóságban is zajló folyamatok minél pontosabb modellezésének irányába mutatnak, amely nélkülözhetetlenné teszi a vizsgálati módszerek, és eredményeik leírására használatos modellek fejlesztését, illetve további, eddig elhanyagolt jelenségek figyelembe vételét.

Az egyik legelterjedtebb hőre lágyuló polimer feldolgozási eljárás, a fröccsöntés numerikus szimulációja során a szoftverek egyelőre számos esetben csak becsült adatokkal, illetve átlagos értékekkel számolnak, amely részben egyes anyagjellemzők költséges, bonyolult és lassú mérésére is visszavezethető. Az átlagos, illetve nem a feldolgozási körülményeknek megfelelő értékek használata jelentősen rontja a szimulációkkal elérhető pontosságot és többletköltséget eredményezhet a gyártás során. A polimerek fröccsöntés szimulációja során az egyik legfontosabb, de egyben legnehezebben mérhető anyagtulajdonság az alapanyag nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat összefüggése (pvT adat) [1].

Napjainkban a pvT adatok mérésére két módszert használnak elterjedten, a piston-die technikát és a körülvevő folyadékos dilatometriát [2]. A két elterjedt mérési mód közös jellemzője, hogy a velük mért fajtérfogat értékek nem a feldolgozás során jellemző hűtési viszonyokra vonatkoznak [2]. Az elmúlt évtizedben több szerző is mutatott be újszerű pvT mérési megoldásokat. Sadeghian [3] és Park [4] extrúziós rendszer segítségével határozott meg pvT adatokat, azonban a fröccsöntés során fellépő nyomásoknál lényegesen kisebb nyomásokon. A fröccsöntőgépek adottságait kihasználva többen [5, 6] is próbálkoztak a fröccsöntés piston-die berendezésként való használatával, azonban a mért értékek pontossága nem volt kielégítő, valamint a nagyobb nyomások tartományában mért eredmények jelentősen eltértek a konvencionális módon mért adatoktól [6].

Munkánk során egy olyan új pvT mérési módszert fejlesztettünk, amely lehetővé teszi a nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat összefüggés az eddigieknél lényegesen gyorsabb és hatékonyabb mérését ömledék állapotban. Az újonnan fejlesztett mérési eljárással a hőre lágyuló polimerek

ömledék állapotot jellemző pVT adatai hagyományos fröccsöntőgép segítségével mérhetőek kiváló pontossággal.

## 2. AZ ÚJ MÉRÉSI MÓDSZER BEMUTATÁSA

Az ömledék állapotú pVT méréseket a már több helyen is publikált módhoz hasonlóan, az fröccsegység ledugózásával végeztük. Az egyes nyomásokon mérhető térfogatokat regisztráltuk, majd a csiga előtt található anyagmennyiséget üresfröccsölés üzemmódban kitoltuk és tömegét megmértük. Az egyes nyomásokon és hőmérsékleteken jellemző térfogat és a minta tömegének ismeretében a fajtérfogat az adatokból számítható. Mivel kisebb vizsgálati nyomáson a konvencionális és az fröccsegységben történt mérések eredményei jelentős eltérést nem mutattak, valamint a nagyobb nyomások esetében az eltérés minden esetben hasonló módon alakult, arra a következtetésre jutottunk, hogy a tapasztalt eltérések elhanyagolásokból származó, rendszeres hibának tekinthetőek. A mérések pontosságának növelésére áttekintettük, hogy melyek azok a mérés során fellépő jelenségek, amelyek elhanyagolása jelentős mérési hibához vezethet, valamint a hibák kompenzálására fizikai alapokon nyugvó módszereket dolgoztunk ki. A feltárt hibák eredetük szerint lehetnek rugalmas alakváltozásokból származóak, hőtágulásból származóak, az ömledéken végzett mechanikai munka hatására visszavezethetőek, a csiga előtti holttérben található ömledék hatására visszavezethetőek, valamint a gép útmérő rendszerének pontatlanságából származóak.

A vizsgálatok során a nagy nyomások miatt jelentős mértékű rugalmas deformációk léphetnek fel mind a hengerben, mind a csigában. A legnagyobb deformáció a csigában axiális irányban keletkezik, a csiga nagy hossz-átmérő viszonyából fakadóan. A várható deformáció nagysága a Hooke törvény (1) segítségével jól közelíthető, ha a csigát prizmatikus rúdnak tekintjük:

$$\Delta l = l \cdot \frac{\sigma}{E}, \quad (1)$$

ahol  $\Delta l$  [mm] a csiga hosszváltozása,  $l$  [mm] a csiga hossza,  $\sigma$  [Pa] a csigában ébredő normál feszültség,  $E$  [Pa] a csiga anyagának rugalmassági modulusa. A csigában ébredő normál feszültséget a mérés során használt nyomás nagyságánál 10%-kal nagyobbak tekintettük, a csiga menetárai által okozott keresztmetszet csökkenés miatt. A mérés során az erőfolyam a hengermodulon keresztül záródik, így a hengert is a csigát terhelő erővel azonos nagyságú erőhatás terheli. A henger keresztmetszete egy nagyságrenddel nagyobb, mint a csigáé, ezért a benne ébredő axiális deformációt elhanyagoltuk. A fröccsegység a benne ébredő hidrosztatikus nyomás hatására radiális deformációt is szenved. Mivel a hengermodul vastagfalú csőnek tekinthető, így a fellépő átmérőváltozás a (2) összefüggéssel számítható:

$$\Delta d = d \cdot p \cdot \frac{1}{E} \cdot \left( \frac{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} + \frac{1}{\nu} \right), \quad (2)$$

ahol  $\Delta d$  [mm] az átmérő megváltozása,  $d$  [mm] az aggregát belső átmérője,  $D$  [mm] az aggregát külső átmérője,  $p$  [Pa] a terhelő belső nyomás,  $E$  [Pa] az aggregát anyagának rugalmassági modulusa,  $\nu$  [-] a hengermodul anyagának Poisson tényezője. A mérés során a hőtágulás hatására az aggregát és a csiga mérete is növekszik mind axiális, mind radiális irányban. A radiális irányú méretváltozás számítható, azonban az axiális irányú méretváltozás hatásának számításához szükséges a henger és a csiga hőmérséklet eloszlásának ismerete. Mivel a csiga hőmérséklet eloszlása nem mérhető, a hőtágulásokból származó méretváltozást az acélra jellemző térfogati hőtágulással (3) vettük figyelembe:

$$V_{T_2} \cong V_{T_1} \cdot [1 + 3 \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_1)], \quad (3)$$

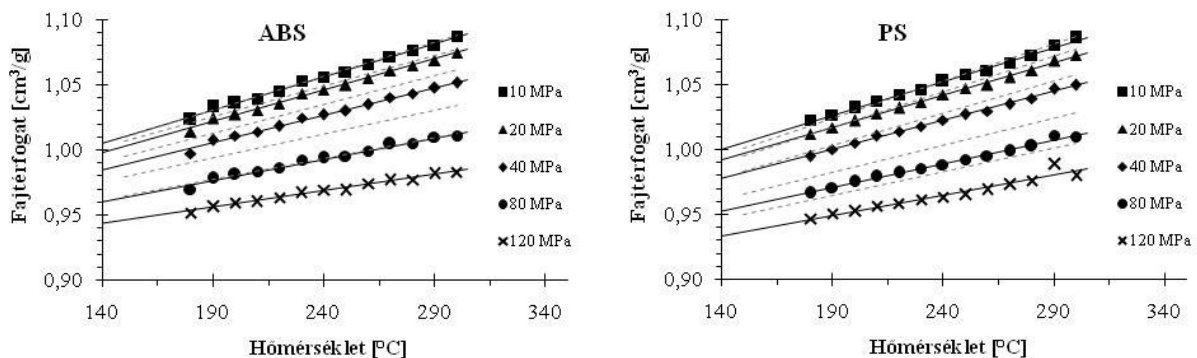
ahol a  $V_{T2}$  [cm<sup>3</sup>] a mérési hőmérsékletre jellemző, hőtágulással korrigált térfogat,  $V_{T1}$  [cm<sup>3</sup>] a gép által kijelzett, szobahőmérsékleten vett térfogat,  $\alpha$  [1/K] az acélra jellemző lineáris hőtágulási együttható,  $T_2$  [°C] a vizsgálati hőmérséklet,  $T_1$  [°C] a szobahőmérséklet. Az ömledék nyomás alá helyezése során hőmérséklet növekedés lép fel az ömledéken végzett mechanikai munka következtében. Ez a hatás megfelelő stabilizálódási idő választásával kiküszöbölhető. Mivel a fröccsöntőgépek csigája nem képes a csiga előtt felgyülemllett összes ömledék kiszorítására, a csiga előtt egy holtter alakul ki. A mérés során nem csak a gép által jelzett anyagmennyiség szenved deformációt, hanem a holtterben található mennyiség is. A hiba kiküszöbölésére a holtter nagyságát meghatároztuk és az ömledék komprimálása során fellépő térfogatváltozást a teljes, holtter nagyságával is növelt ömledék mennyiségre vonatkoztattuk.

### 3. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS BERENDEZÉSEK

A fejlesztett módszer tesztelését amorf alapanyagokon végeztük. A felhasznált alapanyagok BASF Terluran GP-35 típusú akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) és BASF Polystyrol 143E típusú polisztirol (PS) voltak. A méréseket Arburg Allrounder 370S 700-290 Advance típusú fröccsöntőgépen végeztük 180-300°C hőmérséklettartományban, 10-120 MPa nyomástartományban. Az elkészült próbatestek tömegét Ohaus Explorer mérleg segítségével mértük 0,1 mg pontossággal.

### 4. EREDMÉNYEK, ÉRTÉKELÉS

A mérések elvégzése után a különböző nyomás és hőmérséklet értékekre jellemző fajtérfogatot a mért térfogatokból és tömegekből határoztuk meg. A számított adatpontokra izobáronként egyeneseket illesztettünk, hogy a kiértékelés során az adatok kis mértékű ingadozása ne okozhasson hibát. Az 1. ábra a kompenzációk előtti eredményeket szemléltetve összehasonlítva a dilatometriával mért adatokkal. Amint az látható, az irodalomban publikáltaknak megfelelően jelentős eltérés mutatkozik a nagyobb nyomásokon konvencionális módszerrel mért és a fröccsöntőgépen mért eredmények között, így az eredmények nem megfelelőek pontos szimulációk végzéséhez, kompenzációk szükségesek a hibák kiküszöbölésére.

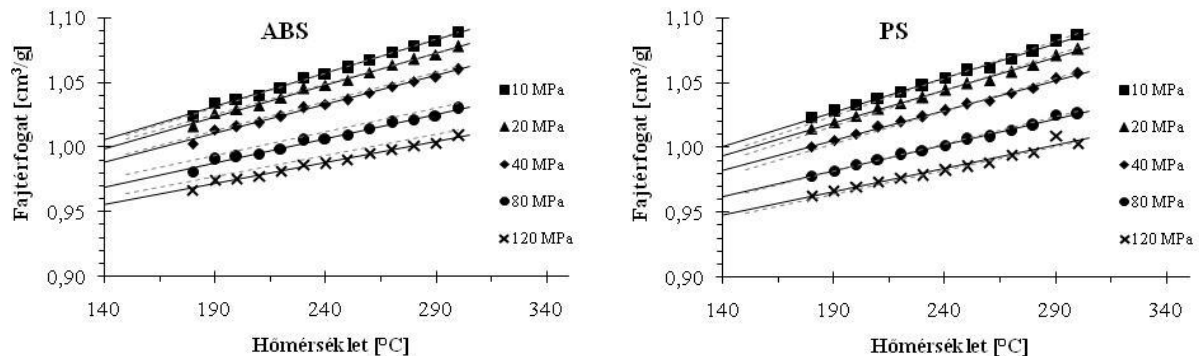


1. ábra

*Kompenzációk nélkül eredmények összehasonlítva a konvencionális eljárás eredményeivel (szaggatott)*

Vizsgálataink rámutattak, hogy a mérésekhez használt fröccsöntőgép csigája előtt 16 cm<sup>3</sup> holtter található, amely még a maximális adagsúly esetén is jelentős eltérést okoz a mért kompresszibilitási értékekben. Mivel a kompresszibilitás a hőmérséklet növekedésével növekszik, a nagyobb hőmérsékletek esetében tapasztalható hiba is nagyobb, amely a hőtágulási együttható látszólagos csökkenését okozza. A mérések során a második legnagyobb hibaforrás a fröccsöntőgép csigájának rugalmas deformációja lehet, ha hatását nem veszik figyelembe az eredmények kiértékelése során. Az általunk használt gép csigájának hossza kb. 800 mm, amely az alkalmazott maximális, 120 MPa fröccsnyomás esetén 0,5 mm rugalmas deformációt szenved. A hőtágulásból származó hiba a vizsgálatok során használt maximális hőmérséklet és adagsúly esetén elérheti az 1,1 cm<sup>3</sup>-t, amelynek elhanyagolása szintén jelentős hibát okozhat a mérések során. A kompenzációkat elvégezve a

tapasztalt hibák jelentősen lecsökkentek, a maximális eltérés a hagyományos technikával mért és az aggregátban mért értékek között  $0,005 \text{ cm}^3/\text{g}$  (2. ábra).



2. ábra

*A kompenzált eredmények összehasonlítva a konvencionális eljárás eredményeivel (szaggatott)*

A fröccsöntőgép segítségével való mérés reprodukálhatósága kiválóan bizonyult, a mért adatok szórása  $0,001 \text{ cm}^3/\text{g}$ -nál kisebbre adódott. A fejlesztett mérési módszer nagy előnye a konvencionális eljárással szemben, hogy a mérés rövid idő alatt elvégezhető, így a méréshez szükséges idő alatt a legtöbb polimer alapanyag gyakorlatilag nem szenved degradációt. Ezáltal a degradációra érzékeny polimerek mérése is jól megoldható.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során egy olyan új mérési módszert fejlesztettünk, amelynek segítségével hőre lágyuló polimerek pvT összefüggése határozható meg ömledék állapotban, fröccsöntőgép használatával. A mért adatok jó egyezést mutattak a hagyományos eljárással mértekkel, a mért adatok szórása  $0,001 \text{ cm}^3/\text{g}$ -nál kisebb. Az új módszer előnye, hogy rövid idő alatt is képes pontos adatokat szolgáltatni az alapanyag pvT adatairól.

### Köszönetnyilvánítás

A cikk a Bolyai János Kutatási ösztöndíj támogatásával készült. A szerzők köszönetüket fejezik ki az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA PD 105995) anyagi támogatásáért. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TÁMOP -4.2.2.B-10/1-2010-0009 program támogatja. Köszönjük továbbá az Arburg Hungária Kft-nek az Arburg Allrounder 370S 700-290 Advance típusú fröccsöntőgépet, a Lenzkes GmbH-nak a szerszámfelfogókat.

### Irodalomjegyzék

- [1] Dunai A., Macskási L.: Műanyagok fröccsöntése, Lexica Kft., Budapest, 2003
- [2] Luyé J.-F.: PVT measurement methodology for semicrystalline polymers to simulate injection-molding process. Journal of Applied Polymer Science, Wiley, 2001, 79, 302–311.
- [3] Sadeghian N., Golzar M.: PVT measurement system for wood plastic composite melt in an extrusion process. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Sage, 2008, 27, 739-750.
- [4] Park S. S., Park C. B., Ladin D., Naguib H. E., Tzoganakis C.: Development of a dilatometer for measurement of the pvT properties of a polymer/CO<sub>2</sub> solution using a foaming extruder and a gear pump. Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME, 2002, 124, 86-91.
- [5] Nunn R.E.: Adaptive process control for injection molding. U.S. Patent 4850217 (1989).
- [6] Sombatsompop N., Liolios K., Mohd Jamel M. H., Wood A. K.: Techniques for pressure-density-temperature measurements in polymer melts. Polym. & Polym. Comp., Smithers Rapra, 1997, 5, 259-264.