

Anyagvizsgálati módszerek fejlesztése fröccsöntési alkalmazáshoz  
Suplicz A, Szabó F, Kovács J G

Accepted for publication in MŰANYAG- ÉS GUMIIPARI ÉVKÖNYV  
Published in 2013

DOI:

# Anyagvizsgálati módszerek fejlesztése fröccsöntési alkalmazáshoz

Napjainkban a fröccsöntési szimulációk jelentős mértékben megkönnyítik a mérnökök munkáját, hogy az új termékek piacra kerülési idejét és a költségeket lecsökkentsék. A pontos szimulációkhoz azonban megfelelő anyagmodellekre van szükség. A legalapvetőbb futtatásokhoz minimálisan négy anyagjellemző szükséges: a fajhő, a viszkozitás, a hővezetési tényező, valamint az alapanyag nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat összefüggése. Munkánk során BASF Terluran GP-35 típusú ABS anyagjellemzőit mértük ki, továbbá a mért értékeket összehasonlítottuk a MoldFlow szimulációs program adatbázisában szereplő értékekkel. A hővezetési tényező meghatározására egy új berendezést fejlesztettünk, a nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat összefüggés feldolgozási körülményeknek megfelelő mérésére új eljárást dolgoztunk ki.

In these days the injection molding simulation software helps to the engineers to lower the production costs and shorten the time to market. To do precise simulations, accurate material model is needed. For a basic injection molding simulations the following four properties are necessary: specific heat, viscosity, thermal conductivity and the pressure-specific volume-temperature (pvT) relationship. In this study the properties of BASF Terluran GP-35 ABS material was determined and compared to the data in the MoldFlow database. For the thermal conductivity measurements new equipment, for the pvT properties determination new measuring method was developed.

## 1. Bevezetés

Napjainkra a műszaki fejlesztések és a számítástechnika térhódítása az egyik legelterjedtebb és legsokoldalúbban használható műanyagfeldolgozási eljárásá ttekk a fröccsöntést. A fröccsöntött termékekkel szemben támasztott egyre magasabb követelmények és az egyre kihegyezettebb gazdasági verseny nem csak a gyártástechnológiában, hanem a terméktervezésben és a gyártás előkészítésében is jelentős fejlődést hozott. Napjainkban az igényes, jó minőségű fröccsöntött alkatrészek gyártását megelőzően szinte elengedhetetlen a gyártás folyamatának számítógépes szimulációja, mivel ennek segítségével az esetleges hibák még a tényleges gyártás megindítása előtt kiküszöbölhetőek, amely pénz és idő megtakarítást eredményez [1, 2]. A fröccsöntési szimulációk múltja egészen az 1970-es évekig nyúlik vissza. Amíg akkoriban főképp csak a kitöltés folyamatának megfelelő modellezése volt a cél, addig napjainkban a szimulációk már jóval több területre irányulnak (például zsugorodás, vetemedés, maradó feszültségek számítása), így a szimulációk már lényegesen több és pontosabb bemenő alapanyag adatot igényelnek,

mint a korai időkben. Mivel az alapanyagok egyes tulajdonságainak kimérése meglehetősen időigényes és drága feladat, több próbálkozás is zajlott az egyes alapanyag családok jellemző tulajdonságainak behatárolására és szimulációs felhasználására. Azonban vizsgálatok rámutattak, hogy lényegesen jobb eredmény érhető el a szimuláció során, ha az adott alapanyagra rendelkezésre állnak a pontos anyagi tulajdonságok [3]. A napjainkban elterjedten használt, kereskedelmi forgalomban is elérhető szimulációs programok a legalapvetőbb futtatásokhoz is minimálisan négy anyagjellemzőt igényelnek, ezek a fajhő, a viszkozitási adatok, a hővezetési tényező, valamint az alapanyag nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat összefüggése (pvT adatok). Az említett bemenő adatokon kívül, a futtatás jellegétől függően szükség lehet még mechanikai jellemzőkre, vagy akár az alapanyag optikai törésmutatójára is. Egyes anyagjellemzők meghatározására rendkívül kifinomult eszközök állnak rendelkezésre és mérési módszerük is megbízható, azonban egyes anyagjellemzők, például a hővezetési tényező, vagy a pvT jellemzők mérése nem tekinthető kiforrottnak, illetve a mért adatok valójában nem

a feldolgozásnak megfelelő körülményekre vonatkoznak. A pontosabb szimulációs eredmények érdekében új berendezéseket fejlesztettünk a hővezetési tényező és pvT adatok pontosabb mérésére.

A fröccsöntési szimulációk elvégzéséhez a polimer anyagok egyik alapvető fizikai paramétere a hővezetési tényező. Ez nagyban meghatározza a termék hűlési folyamatát, ami több jellemzőre is kihatással van (pl.: elérhető folyási úthossz, lepecsételődési idő, hűtési idő, ciklusidő). A polimer alapanyagok hővezetési tényezőjének meghatározására a két legelterjedtebb módszer a forrólapos eljárás (Hot Plate), valamint a Flash módszer. A Hot Plate eljárás egy igen egyszerű mérési mód, amelynek alapja a Fourier törvény (2). A módszer hátránya, hogy a mért értéket állandósult állapotban kell leolvasnunk, így egy mérés sok időt vesz igénybe. Azonban az eredményekből a hővezetési tényező közvetlenül számítható. Ezzel szemben a Flash módszer sokkal gyorsabb, néhány másodperc alatt eredményt szolgáltat. Hátránya, hogy a mérési értékekből közvetlenül a hőmérsékletvezetési tényező számítható, majd a fajhő és a sűrűség ismeretében a hővezetési tényező [4].

A polimerek nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat összefüggése nem csak a polimerfizika rendkívül fontos anyagtulajdonsága [5], hanem a fröccsöntés technológiai tervezésének és szimulációjának is nélkülözhetetlen adata. Mivel a polimerek hőtágulási együtthatója átlagosan egy nagyságrenddel nagyobb, mint a fémeké, valamint a polimerek lényegesen nagyobb fajtérfogat változást szenvednek a nyomás változtatásának hatására, mint a fémek, a megfelelő pontosságú termékek gyártásakor elkerülhetetlen a pvT tulajdonságok szem előtt tartása. Napjainkban a pvT tulajdonságok mérésére két mérési módszert használnak elterjedten, a Piston-die és a Confining Fluid technikát. A két módszer közös jellemzője, hogy segítségével a pvT adatok nem határozhatóak meg a feldolgozási körülményeknek megfelelő hőtani paraméterek mellett [6]. Az elmúlt néhány évben többen is próbálkoztak gyári berendezés továbbfejlesztésével, illetve új berendezések kifejlesztésével is, amelyek extrúzió során, vagy speciális fröccsöntő szerszám segítségével végzik a mérést [7, 8]. Mind-

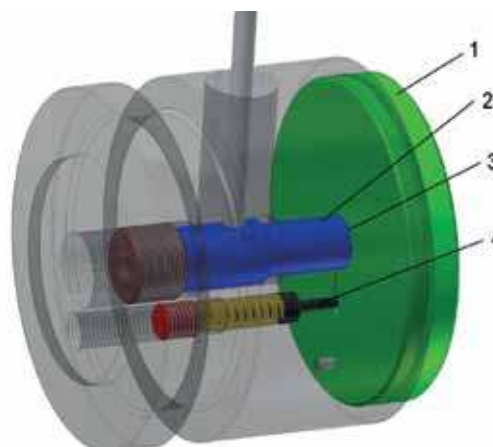
ezek ellenére olyan berendezés, amellyel a fröccsöntés során végbemenő folyamatoknak megfelelő körülmények között lenne végezhető a pvT mérés, egyelőre nem került bemutatásra.

## 2. Kísérleti rész

A kísérleti részben a fröccsöntési szimulációk futtatásához elengedhetetlen anyagmodellek négy alapvető elemének meghatározási módszerét mutatjuk be. A pvT tulajdonságok és a hővezetési tényező mérésére saját fejlesztésű berendezéseket alkalmaztunk. A fajhőt és a viszkozitásgörbét hagyományos módon, DSC berendezéssel és kapillár viszkoziméterrel határoztuk meg.

### 2.1 pvT tulajdonságok meghatározása

Az alapanyag pvT tulajdonságainak meghatározására egy új eljárást fejlesztettünk ki, amellyel a fajtérfogat teljes mértékben a feldolgozás hőtani viszonyainak megfelelően mérhető, az alapanyag feldolgozása során. A mérés egy speciális szerszám segítségével történik, amelyben a szerszámba juttatott polimer ömledék hűtése során bekövetkező méretváltozás és ezáltal a fajtérfogat változás folyamatosan mérhető [9]. A mérés izobár körülmények között zajlik, a mérés során a nyomást egy a szerszámba épített mozgatható mag tartja fenn, a fröccsöntőgép aggregátja csak a szerszám kitöltését végzi. A szerszám szerkezeti vázlatát az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra A pvT mérő berendezés felépítése  
(1- beömlő lap, 2- mozgatható mag, 3- mérőtér, 4- rugós működtetésű visszaáramlást gátló szelep)

A mérési folyamat a szerszám zárásával és az ömledék befröccsöntésével kezdődik. A befröccsöntés során az ömledék először a beömlő lapon (1. ábra /1) kialakított elosztó csatornát tölti fel, majd egy rugós működtetésű szelephez ér (1. ábra /4). A nyomás növekedésével a szelepre egyre nagyobb erő hat, amely egy előfeszített rugó ellenében nyitja a szelepet. A szelep nyitását követően az ömledék kitölti a formaüregt (1. ábra /3), amely egyben a mérőtér is, majd a teljes kitöltést követően a rendszer nyomása lecsökken és a rugós szelep lezárja a visszaáramlás útját. A visszaáramlás kiküszöbölése fontos szerepet játszik a mérés pontosságának biztosításában. A szelep zárását követően a szerszám mozgatható magja (1. ábra /2) felépíti a mérés során használni kívánt nyomást. A nyomás felépülését követően kezdetét veszi a mérés, amely során a dugattyú folyamatos elmozdulásával követi a minta méretváltozását a teljes kihűlésig. A mag mozgását egy hidraulikus henger, vagy akár a fröccsöntőgép hidraulikus kilökő egysége is végezheti. A mérés során a formaüreg térfogatváltozása a mag elmozdulásából számítható, így a minta tömegének mérésével az átlagos fajtérfogat már adódik. Mivel a minta a mérés során intenzív hűtésnek van kitéve, a minta egyes részei között jelentős hőmérséklet különbség alakul ki, amely függ a minta vastagságától, az anyagi jellemzőktől és a szerszám, illetve ömledék hőmérséklettől. Mivel a polimerek jellemzően rossz hővezetők, a kialakuló hőmérséklet különbség akár a 100°C-ot is meghaladhatja. Annak érdekében, hogy a mért eredmények ne legyenek a hőmérséklet eloszlás hatása által okozott hibával terhelvek, egy kompenzációs módszert dolgoztunk ki, amely a fajtérfogat számítása során figyelembe veszi a minta pillanatnyi hőmérsékletkülönbség eloszlását. Mivel a fröccsöntött darabok hőmérséklet eloszlásának mérése egyelőre nem megoldott, a hőmérséklet eloszlást számítottuk. A számítások során azzal az egyszerűsítéssel élünk, hogy a mérésekhez használt 30 mm átmérőjű próbatest a palástfelületén nem ad le hőt. A hővezetés egyszerűsített differenciálegyenletét explicit közelítéssel oldottuk meg:

téssel oldottuk meg:

$$\frac{t(x, \tau + \Delta\tau) - t(x, \tau)}{\Delta\tau} = a \cdot \frac{t(x + \Delta x, \tau) + t(x - \Delta x, \tau) - 2 \cdot t(x, \tau)}{\Delta x^2}, \quad (1)$$

ahol  $t$  [°C] a hőmérséklet,  $\tau$  [s] az idő,  $x$  [m] a hely, a [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] pedig a hőmérséklet vezetési tényező. A számításhoz szükséges fajhő adatokat DSC-méréssel, a hővezetési tényezőt pedig az általunk fejlesztett berendezéssel határoztuk meg.

## 2.2 Hővezetési tényező meghatározása

A fröccsöntési szimulációhoz elengedhetetlen az alapanyag hővezetési tényezőjének ismerete, ugyanis ez jelentősen meghatározza a termék hűlési folyamatait, illetve az ahhoz kapcsolódó jellemzőket. A hővezetési tényező meghatározásához egy Hot Plate elven működő berendezést készítettünk el. A módszer lényege, hogy a vizsgálni kívánt próbatest két oldala között hőmérsékletkülönbséget hozunk létre, ami hatására hőáram indul el a melegebb oldal felől a hidegebb oldal irányába. Az egyensúlyi helyzet (állandósult hőáram) beállta után a minta hővezetési tényezője egyszerűen számítható a hőáram, a minta vastagsága és a kialakult hőmérsékletkülönbség ismeretében. Az előző mennyiségek között a Fourier egyenlet [4, 10, 11] teremti meg az összefüggést (2):

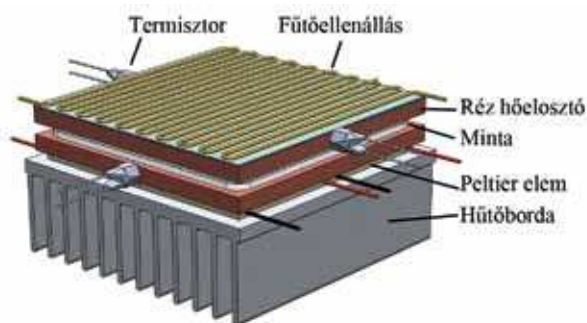
$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (2)$$

ahol  $Q$  [W] a kialakult hőáram,  $\lambda$  [W/mK] a minta hővezetési tényezője,  $A$  [ $\text{m}^2$ ] a minta hőáramra merőleges keresztmetszete,  $\Delta T$  [°C] a kialakult hőmérsékletkülönbség és  $\Delta x$  [m] a minta vastagsága. A hőmérsékletkülönbség többnyire villamos fűtéssel hozható létre, így a bevezetett teljesítményből (az áramerősség és a feszültség szorzatából) számítható a hőáram. Az eljáráshoz kétféle konstrukció létezik, a szimmetrikus és az aszimmetrikus berendezés. Szimmetrikus esetben két minta közé helyezünk egy fűtőlapot, így a hőáram két irányba fog haladni. Aszimmetrikus esetben csak egy hűtő-, illetve fűtőlapra és egy próbatestre van szükség. Ebben az esetben a hő egy irányba fog haladni [4].

Az általunk elkészített berendezés aszimmetrikus (2. ábra) elrendezésű, ahol a fűtést AlCr ellenállás-huzallal, a hűtést pedig félvezető Peltier-elemekkel biztosítottuk. A Peltier-elemek hűtését passzív hűtés biztosítja (alumínium hűtőborda). A hűtött és a fűtött oldalon az egyenletes hőmérsékletelosztás érdekében 1-1 85x85x5 mm-es réz hő-elosztó lapot szereltünk be. A kialakult hőmérsékleteket oldalanként 2-2 termisztor (Epcos B57045K) segítségével határozzuk meg. A termisztorok beépítés előtti kalibrációját a Steinhart-Hart összefüggés (3) [12] segítségével végeztük el, ami a mért ellenállás és a hőmérséklet közötti összefüggést határozza meg:

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot (\ln(R))^3, \quad (3)$$

ahol  $R$  [ $\Omega$ ] a termisztor ellenállása adott  $T$  [K] hőmérsékleteken,  $A$ ,  $B$  és  $C$  pedig a Steinhart-Hart egyenlet együtthatói. A hőveszteségek elkerülése, illetve minimalizálása érdekében a mérőeszközt polisztirol habbal szigeteltük el a környezettől.



2. ábra Hot Plate berendezés felépítése

### 2.3 Fajhő mérése

Ahhoz, hogy a fröccsöntési szimulációkból helyes eredményeket kapjunk, nem csak az anyag hővezetésére, hanem annak fajhőjére is szükségünk van. A fajhő ( $c_p$  [J/kgK]) nem más, mint egy egységnyi tömegű anyag hőmérsékletét 1°C-al megváltoztató energiamennyiség. Az alapanyag fajhőjét a TA Instruments által gyártott DSC Q2000 típusú differenciális pásztázó kaloriméter segítségével határoztuk meg. A mérés során egy fűtés-hűtés-fűtés programot végeztünk el 0°C és 300°C között 5°C/perc-es sebességgel. A DSC berendezés mérés során hőkapacitást számol. Ezt az ér-

téket természetesen át kell számítanunk fajhő értékre, ami a minta tömegével történő osztás. Mivel szimulációk során a polimer alapanyag hűlését vizsgáljuk, így a hűtési szakaszban mért fajhőgörbét kell felhasználnunk a szimulációk során.

### 2.4 Folyási görbék mérése

A feldolgozás közben lejátszódó folyamatok ismerete nélkülözhetetlen a tervezéshez. A polimer alapanyagok fröccsöntése során azok ömledék állapotba kerülnek, ahol a folyóképességgel jellemezhetjük az anyagot. Ez a dinamikai viszkozitás reciproka. Az alapanyagok gyakorlati jellemzésére a folyási mutatószám használatos (MFI=Melt Flow Index). Az MFI mérést széles körben használják a gyakorlatban, azonban ez az érték a szimulációs számításokhoz nem alkalmazható, mivel a teljes folyásgörbének csak egyetlen pontját szolgáltatja és azt is csak nagyon kis (~1-50 1/s) nyírósebesség mellett [13].

A viszkozitásmérést Zwick Z050 típusú, számítógép vezérelt szakítógépre szerelt Instron típusú kapillár viszkoziméterrel végeztük el. A méréseket négy különböző hőmérséklet mellett (220; 240; 260 és 300°C), három eltérő hosszúságú kapillárisal, esetenként hét különböző nyírósebességgel mértünk. A kísérletek során felhasznált kapillárisok jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza.

	Hossz (L) [mm]	Átmérő (D) [mm]
1. kapilláris	25,56	1,51
2. kapilláris	50,93	1,53
3. kapilláris	67,68	1,50

1. táblázat Kapillárisok jellemző méretei

A vizsgálatok során az adott beállítások mellett kialakuló erőt mértük. A végső célunk az anyag viszkozitásának a meghatározása, amelyhez a következő összefüggéseket alkalmazhatjuk:

Látszólagos nyírósebesség:

$$\dot{\gamma}_l [s^{-1}] = \frac{4Q}{\pi R^3}, \quad (4)$$

Látszólagos nyírófeszültség:

$$\tau_l [Pa] = \frac{\Delta P \cdot R}{2L}, \quad (5)$$

Látszólagos viszkozitás:

$$\eta_l [Pa \cdot s] = \frac{\tau_l}{\dot{\gamma}_l}, \quad (6)$$

ahol  $Q$  a térfogatáram,  $R$  és  $L$  a kapillárisra jellemző sugár és hosszúság,  $\Delta P$  a nyomáskülönbség.  $Q$  és  $\Delta P$  a mért adatokból és a dugattyú átmérőjéből ( $D_d=9,525$  mm), valamint a keresztfej sebességéből számolható:

$$Q = D_d \cdot v_{keresztfej}, \quad (7)$$

$$\Delta P = \frac{F}{(D_d^2 \cdot \pi) \cdot 4}, \quad (8)$$

A (7) (8) összefüggésben  $v_{keresztfej}$  a keresztfej sebessége, valamint  $F$  a mért erő.

A kapillárisban bekövetkező belépési és kilépési nyomásvesztések hatásának kiküszöbölésére Bagley korrekciót alkalmaztunk:

$$\tau_f = \frac{\Delta P \cdot R}{2(L + R \cdot n_B)}. \quad (9)$$

A három kapillárisnál a nyomáskülönbségeket ( $\Delta P$ ) az  $L/R$  függvényében ábrázolva egyenest kapunk, amelynek tengelymetszete megadja az  $n_B$  korrekciós tényezőt. A korrekciós tényező a nyírósebesség függvénye is, tehát a korrekciót mindegyik (látszólagos) nyírósebesség értéknél el kell végezni.

Mivel a résben az áramlási sebességprofil alakja nem parabolikus, így a fal melletti nyírósebesség korrigálására Rabinowitsch korrekciót alkalmaztunk:

$$\dot{\gamma}_f = \frac{3 + b_1}{4} \dot{\gamma}_l, \quad (10)$$

$$b_1 = \frac{d \ln(\dot{\gamma}_l)}{d \ln(\tau_f)}. \quad (11)$$

A Bagley korrekció után kapott  $\tau_f$ -et és a látszólagos nyírósebességet log-log koordináta rend-

szerben ábrázolva, a kapott egyenes meredeksége megadja a  $b_1$  korrekciós tényező értékét, amellyel a valódi nyírósebesség kiszámolható. A  $\tau_f$  és a  $\dot{\gamma}_f$  hányadosából a valódi, szerszámgeometriától független viszkozitás adódik:

$$\eta = \frac{\tau_f}{\dot{\gamma}_f}. \quad (12)$$

A polimerek viszkozitása idő-, nyomás- és nyírósebesség-függő tulajdonság, amely leírására számos matematikai modell ismeretes. Az egyik ilyen a Cross egyenlet, amely széles nyírósebesség tartományban használható összefüggés. A legtöbb szimulációs program a Cross egyenlet hőmérséklet független alakját, a Cross WLF egyenletet alkalmazza:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left( \frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{(1-n)}}, \quad (13)$$

$$\eta_0 = D_1 \cdot \exp \left[ \frac{-A_1 \cdot (T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right], \quad (14)$$

$$T^* = D_2 + D_3 \cdot p, \quad (15)$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 \cdot p, \quad (16)$$

ahol  $\eta$  a viszkozitás [Pa s],  $\eta_0$  a kezdeti viszkozitás [Pa s],  $\dot{\gamma}$  a nyírósebesség [1/sec],  $T$  a hőmérséklet [K],  $n$ ,  $\tau^*$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $A_1$ ,  $\tilde{A}_2$  pedig az adatillesztés során kapott együtthatók [13].

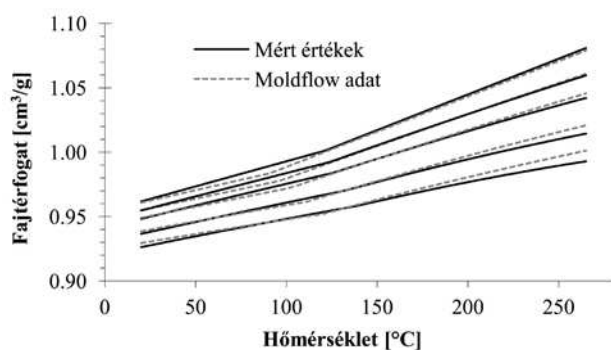
### 3. Eredmények és értékelésük

A mérési eredmények kiértékeléséhez a mért és számított értékeket a MoldFlow szimulációs programjában található értékekkel hasonlítottuk össze. Az egyes helyeken rámutattunk az eddigi módszerek hibáira is.

#### 3.1 pvT adatok

Az alapanyag pvT tulajdonságait az újonnan fejlesztett módszerrel vizsgáltuk, a méréseket Arburg Allrounder 370S 700-290 Advance gépen végeztük. A vizsgálatok során az ömledék hőmérséklet

250°C, a szerszámhőmérséklet pedig 25°C volt. A mérések előtt az alapanyagot négy órán át, 80°C-on szárítottuk. Az elkészített próbatestek tömegét közvetlenül a fröccsöntés után mértük Ohaus Explorer analitikai mérleg segítségével. Az egyes izobár értékekhez tartozó elmozdulás görbéken elvégeztük a mintában kialakuló hőmérséklet eloszlás hatásának kompenzációját, majd a kéttartományú Tait egyenlet illesztését. Az adatbázisban is megtalálható, valamint az új módszerrel mért adatokat a 3. ábra foglalja össze.



3. ábra BASF Terluran GP-35 alapanyag pvT görbéi 0,1; 20; 40; 80 és 120 MPa nyomáson

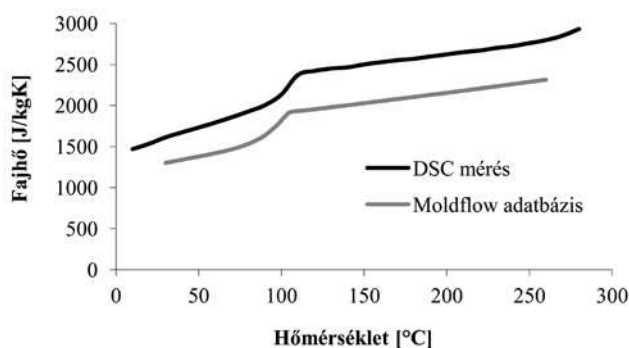
Amint látható, az új módszerrel mért pvT görbék jellegüket tekintve megfelelnek az amorf anyagoknál megszokottaknak. A mért és az adatbázis adatait összehasonlítva megállapítható, hogy a mért adatok alapján az alapanyag kompressziós modulusa kisebb mind a  $T_g$  alatti, mind a  $T_g$  feletti hőmérséklet tartományban, mint az adatbázis adatai alapján számítható. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy az alapanyag egységnyi nyomásváltozás hatására nagyobb térfogatváltozást szenved. Megfigyelhető továbbá, hogy az általunk végzett mérések esetén a lényegesen nagyobb hűtési sebesség miatt az üvegesedési hőmérséklet a nagyobb hőmérsékletek irányába tolódott az adatbázis értékeihez képest. Az új mérési módszer előnye, hogy a hagyományos mérési módszerekhez képest jóval gyorsabban szolgál információkkal az alapanyag pvT tulajdonságairól, valamint hogy ezek az adatok valóban a fröccsöntés közben kialakuló viszonyokra vonatkoznak.

### 3.2 Hővezetési tényező

Az ABS alapanyag hővezetési tényezőjét a Hot Plate berendezéssel mértük meg. A méréshez két 80x80x2 mm méretű fröccsöntött próbatestet alkalmaztunk. A felületek között kialakuló hőellenállás lecsökkentése végett, és így a mérés pontosságának javítására az érintkező felületek között szilikon alapú hővezető pasztát alkalmaztunk. A fűtött oldalt 3,88 W nettó fűtési teljesítménnyel fűtöttük fel. A hűtött oldalon a Peltier-elemek hőmérsékletét 50°C állítottuk be. Így 10°C-os hőmérsékletkülönbség alakult ki a két oldal között, tehát az eredményeket 55°C-on határoztuk meg. A mérés eredményeként az ABS Terluran GP-35 anyag hővezetési tényezője 0,26 W/mK.

### 3.3 Fajhőmérés eredménye

A DSC mérés hűtési görbéjéből számított fajhőértékeket a 4. ábra mutatja. Ez alapján a Terluran GP-35 alapanyag fajhője 1500 és 3000 J/kgK között változik a hőmérséklet függvényében. Továbbá látható, hogy az általunk kapott értékek hasonló lefutást mutatnak, mint a MoldFlow program adatbázisában található értékek, azonban tipikusan 300-400 J/kgK-nel nagyobbak. Ez az eltérés abból adódik, hogy amíg mi a hűtési görbéből számítottuk a fajhőt, addig a MoldFlow adatbázisban a fűtési görbéből számították. Mivel a fröccsöntési szimulációban a polimer alapanyag hűlési és hűtési viszonyait vizsgáljuk, így célszerű az erre a folyamatra jellemző mérési körülményeket biztosítani.



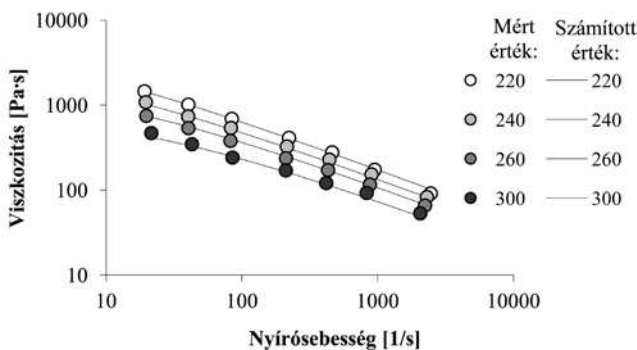
4. ábra ABS Terluran GP-35 alapanyag mért és illesztett fajhőgörbéje

### 3.4 Viszkózitási eredmények

A négy különböző hőmérsékleten mért viszkózitási értékekre Cross WLF egyenletet illesztettünk és számítottuk annak együtthatóit. Az adatillesztés eredményét a 2. táblázat mutatja. A viszkóziméterrel mért értékeket és a számított viszkózitásgörbéket az 5. ábra mutatja. Az ábra alapján látható, hogy a mérésekhez igen jól illeszthető az egyenlet.

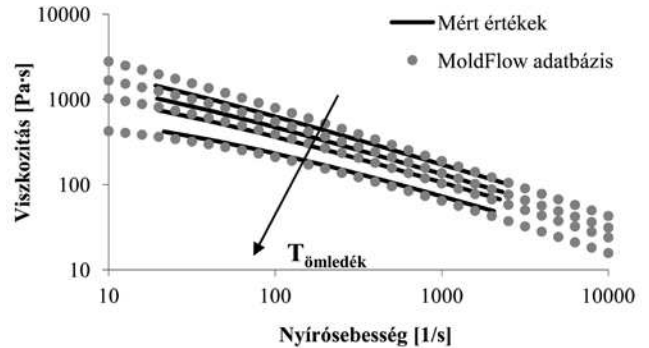
Együttható	Érték
n	0.41
$\tau^*$	15026.56
$D_1$	$3.2 \cdot 10^{16}$
$D_2=T^*$	302.31
$D_3$	0.00
$A_1$	37.23
$\tilde{A}_2=A_2$	52.34

2. táblázat A Cross WLF egyenlet együtthatói



5. ábra ABS Terluran GP-35 alapanyag mért és számított viszkózitásgörbéi

Szintén összehasonlítottuk a mérési eredményeinket a MoldFlow adatbázisában megtalálható értékekkel. Az 6. ábra alapján látható, hogy a mért értékekre illesztett görbék nagy nyírsebesség tartományban ( $\dot{\gamma} > 100$  1/s) igen jó egyezést mutatnak az adatbázis értékeivel, azonban  $\dot{\gamma} < 100$  1/s tartományon már eltérés tapasztalható a 200 és 220°C-os méréseknél.



6. ábra ABS Terluran GP-35 alapanyag mért és számított viszkózitásgörbéi

### 4. Összefoglalás

A fröccsöntési szimulációs programok adatbázisában szereplő anyagmodellek pontossága nagymértékben befolyásolja a szimulációk eredményeit. Ezért ha megfelelően pontos eredményeket szeretnénk elérni, az anyagparaméterek meghatározása elengedhetetlen lépése a folyamatnak. Munkánk során bemutattunk négy mérési módszert, amelyek segítségével meghatározhatóak a fröccsöntési szimulációhoz nélkülözhetetlen anyagmodellek négy alapjellemezője. Ez a négy paraméter a fajhő, a viszkózitás, a hővezetési tényező, valamint a pvT összefüggés. A fajhőt és a viszkózitásgörbéket hagyományos módon, DSC berendezéssel és kapillár viszkóziméterrel határoztuk meg. A hővezetési tényező és a pvT görbék kimérésére saját fejlesztésű berendezéseket alkalmaztunk. A pvT görbéket a hagyományos módszerektől eltérően fröccsöntés közben, azaz valós feldolgozási körülmények mellett határoztuk meg. Így sokkal pontosabb eredményeket kapunk, a hagyományos mérési idő töredéke alatt.

### 5. 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 370C 700-250 Advance típusú fröccsöntőgépet, a Lenzkes GmbH-nak a szerszámfelfogókat.

*SUPLICZ ANDRÁS\**

*doktorandusz*

*SZABÓ FERENC\**

*doktorandusz*

*KOVÁCS JÓZSEF GÁBOR\**

*egyetemi docens*

*\*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi  
Egyetem, Gépészmérnöki Kar,  
Polimertechnika Tanszék*

## 6. Irodalomjegyzék

1. Dunai A., Macskási L.: Műanyagok fröccsöntése, Lexica Kft., Budapest, 2003.
2. Sikló B., Kovács J. G.: Anyagtulajdonságok modellezése és mérése fröccsöntési szimulációhoz, Műanyag és Gumi, 47, 330-334 (2010).
3. S. Endert, E. Gaitzsch, P. Wendisch: Simulation mit varierten Stoffdaten. Kunststoffe, 92, 66-69 (2002).
4. K. D. Maglic, A. Cezairliyan, V. E. Peletsky: Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods. Plenum Press. 1984.
5. M. Hess: The use of pvT measurements in polymer science. Macromolecular Symposia, 214, 361-379 (2004).
6. J.F. Luyé: PVT measurement methodology for semicrystalline polymers to simulate injection-molding process. Journal of Applied Polymer Science, 79, 302-311 (2001).
7. N. Sadeghian, M. Golzar: PVT measurement system for wood plastic composite melt in an extrusion process. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 27, 739-750 (2008).
8. J. Wang, P. Xie, Y. Ding, W. Yang: Online testing equipment of P-V-T properties of polymers based on an injection molding machine. Polymer Testing, 28, 228-234 (2009).
9. F. Szabó, J. G. Kovács: Development of a novel pvT measuring technique. Materials Science Forum, 729, 126-131 (2013).
10. A. Suplicz, J. G. Kovács: Development of thermally conductive polymer materials and their investigation. Materials Science Forum, 729, 80-84 (2013).
11. J. G. Kovacs, G. Kortelyesi, N. K. Kovacs, A. Suplicz: Evaluation of measured and calculated thermal parameters of a photopolymer, International Communications in Heat and Mass Transfer, 38, 863-867 (2011).
12. C. Chen: Evaluation of resistance-temperature calibration equations for NTC thermistors. Measurement; 42, 1103-1111 (2009).
13. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetem Kiadó, Budapest, 2006.