

Anyagtulajdonságok modellezése és mérése fröccsöntési szimulációhoz Modelling and measurement of material properties for injection moulding simulations Kovács József Gábor

Kulcsszavak: polimer, fröccsöntés, szimuláció
Keywords: polymer, injection moulding, simulation

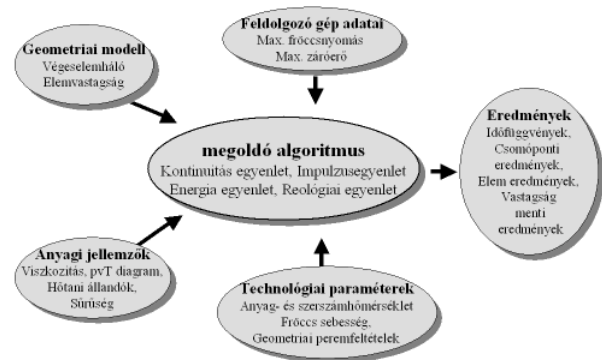
Abstract

Nowadays it is common in polymer processing technologies such as in injection moulding to use computer simulations. The injection moulding simulation software is based on an algorithm describing the physical phenomena mathematically. In our work the import of self-prepared materials – 10, 20, 30 wt% fibre filled polypropylene – to simulation database was performed. Mathematical modelling and definition of the material related constants as well as their adaptation into simulation software were needed for the applicability of these materials in analyses. For this purpose processing properties of the materials like viscosity, specific volume behaviour and thermal characteristics were defined. On the base of the measurement results the mathematical models of the materials were created.

Bevezetés

Napjainkban mindinkább elterjedt a számítógépes tervezés, amely nem zárul le a termék geometriai modelljének megalkotásával, hanem tovább folytatódik annak geometriai optimalizálásával és a gyártástechnológia szimulációjával. Az általános gépészeti tervezésben, de még inkább a műanyag-feldolgozásban a méretezési eljárások számos esetben olyan bonyolult rendszert alkotnak, hogy azokat nem lehet analitikusan, zárt formában megoldani. A számítástechnika fejlődésével lehetővé vált a numerikus közelítési eljárások, azon belül a végesesemes módszerek alkalmazása (FEM – Finite Element Method), amelyek régebben túl sok időt vettek igénybe. A tervezési és megmunkálási műveletek modellezését a folyamatmodellezés (CAE – Computer Aided Engineering) követte, amely jelentős térhódítással rövid idő alatt meghatározóvá vált a termékfejlesztésben. Napjainkban a polimer-feldolgozás minden területén alkalmaznak valamilyen számítástechnikai eszközt és módszert. Számítógépekkel oldanak meg rendkívül bonyolult módon egymásra ható áramlási és hővezetési feladatokat, ahol az

áramlás geometriája igen bonyolult lehet, valamint a polimer a feldolgozás során fázisátalakulásokon (olvadás, megszilárdulás) is keresztül mehet [1, 1].



1. ábra A fröccsöntési szimulációs programok működési vázlatja [1]

Figure 1. Schematic diagram of the simulation software function

A fröccsöntési szimulációs programok egy megoldó algoritmusra épülnek, amelyet kiegészítenek az ahhoz csatolt további segédprogramok és adatbázisok (1. ábra). A program elméleti magja a fizikai jelenségeket matematikailag leíró megoldó algoritmus, amely a számításokat az adott geometriára felvett végesesemes modellen elvégzi. Ez a matematikai leírás a folytonossági-, impulzus-, energia és reológiai egyenleteken alapul, és számos anyagi jellemzőt és technológiai paramétert igényel a számításokhoz [1, 3, 4, 5-8].

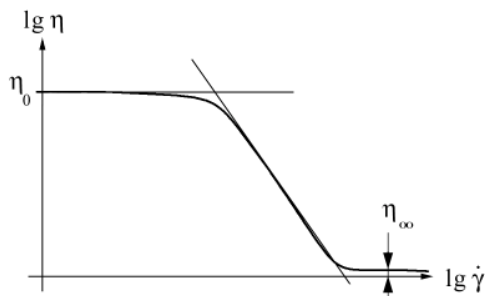
A szimulációkban való alkalmazáshoz az anyagjellemzők mérési eredmények alapján történő matematikai modellekkel való leírására, a hozzájuk kapcsolódó konstansok meghatározására, és azok szoftveres illesztésére van szükség. A szimulációhoz alkalmazott modellek megalkotásához az anyagok feldolgozási jellemzőinek meghatározása elengedhetetlen. Ez technológiai oldalról tekintve az alapanyag folyási, fajtérfogató-változási, illetve hőtani tulajdonságainak ismeretét teszi szükségessé. Munkánkban ezeknek a jellemzőknek a

meghatározását mutatjuk be különböző tömegszázalékban üvegszállal erősített polipropilén esetén.

Polimerek folyási tulajdonságai

Az alapanyagok fröccsöntés során ömledék állapotban kerülnek feldolgozásra, ezért ebből a szempontból a közben lejátszódó folyamatok ismerete nélkülözhetetlen. A folyóképesség a termoplasztikus polimerek fontos tulajdonsága, ami alatt a dinamikai viszkozitás reciprokát értjük. Gyakorlati jellemzésére a folyási mutatószám használatos (MFI). A szabványos folyási mutatószám az a grammokban kifejezett anyagmennyiség, amely a vizsgálati és anyagszabványban előírt hőmérséklet és nyomás mellett a szabványos mérőkészülék nyílásán 10 perc alatt kifolyik. Az MFI a folyási tulajdonságok legegyszerűbb leírásmódja, azonban szimulációs számításokhoz az információ nem elégséges. Nagyságából pusztán arra lehet következtetni, hogy egy adott anyag fröccsöntésre alkalmas vagy nem. Az MFI a szimulációs számításokhoz nem használható, hiszen az csak egy – ráadásul igen alacsony – nyírósebesség mellett jellemzi a folyási képességet. A fröccsöntés során ennél lényegesen nagyobb nyírósebességek ébrednek, ezért elengedhetetlen a folyási tulajdonságok ismerete a nyírósebesség függvényében.

A polimerek viszkozitása idő-, a nyomás- és a nyírósebesség-függő viselkedés, amely leírására számos matematikai modell ismeretes. A Cross egyenlet széles nyírósebesség tartományban használható összefüggés (2. ábra).



2. ábra A Cross egyenletben szereplő η értelmezése
Figure 2. Interpretation of the η component in the Cross equation

$$\frac{\eta_0 - \eta_\infty}{\eta - \eta_\infty} = 1 + k \cdot \dot{\gamma}^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

A Cross egyenlet előnye, hogy nem hanyagolja el nagy nyírósebesség tartományban a viszkozitást (η_∞). Természetesen a Cross egyenletnek is, mint minden viszkozitás egyenletnek, létezik másik alakja is. A szimulációs programok egy, az előzőtől eltérő alakot használnak.

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0}{1 + c(\eta_0 \cdot \dot{\gamma})^{(1-n)}} \quad (2)$$

Az egyenletben szereplő nullviszkozitást a következőképpen értelmezi.

$$\eta_0(T, p) = B \cdot e^{\left(\frac{T_b}{T}\right)} \cdot e^{\beta \cdot p} \quad (3)$$

Az η_0 meghatározásában szereplő tagok közül a T_b a hőmérséklettényező, a β pedig a nyomástényező. A program lehetőséget ad arra, hogy a mért $\eta - \dot{\gamma}$ függvény adataiból az egyenlet paramétereit meghatározzuk.

A Moldflow szimulációs program a Cross egyenletnek a következő alakját használja a kitöltési szimulációhoz.

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left[\frac{\eta_0(T) \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right]^{(1-n)}} \quad (4)$$

A fenti egyenletben a nullviszkozitást a következőképpen definiálja:

$$T > T_{trans} \rightarrow \eta_0(T, p) = B \cdot \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \cdot \exp(\beta \cdot p) \quad (5)$$

$$T < T_{trans} \rightarrow \eta_0(T, p) = \infty$$

A T_{trans} a fagyási hőmérséklet, ami megegyezik a T_g üvegesedési hőmérséklettel amorf polimerek esetén, illetve 30°C-kal alacsonyabb, mint a T_c kristályosodási hőmérséklet kristályos polimerek esetén.

Az egyenletnek ez a formája ötparaméteres (η , τ^* , B , T_b , β), amely igen jó közelítést adhat, hiszen szélesebb nyírósebesség-tartományban alkalmazható, mint az előző alak. A τ^* reprezentálja az átmenetet a newtoni és a közbülső szakasz között, amelynek meredekségét az $(1-n)$ értéke írja le, ahol n a hatványtörvényben is szereplő hatványkitevő. Az egyenletben szerepel a nullviszkozitás (η_0) is, amelynek hőmérséklet-érzékenységét a T_b hőmérséklet írja le. A nullviszkozitás nyomásfüggését a β paraméter határozza meg, amelyet legtöbb esetben el szoktak hanyagolni. A B konstans a nullviszkozitás értékét adja meg korrekciók nélkül. Ez a modell alkalmas a kitöltési folyamat közbeni számításhoz, mivel a hőmérsékletek ekkor többnyire a T_b hőmérséklet felett maradnak. Széles hőmérséklet tartományokban, valamint ha a feldolgozási hőmérséklet a T_b alá esik, nem szerencsés ezt a modellt alkalmazni, így az utónyomásos számításánál nem ezt az egyenletet használják a szimulációs programok.

A bemutatott Cross egyenletnek a hőmérséklet-független alakját, azaz a Cross-WLF egyenletet alkalmazza a legtöbb szimulációs program. A Cross egyenlet a WLF taggal kiegészítve alkalmazható az utónyomások számításánál való alkalmazásra is. Ez azért van így, mert a hőmérséklet- és nyomásérzékenysége sokkal jobb lesz a nullvizkozitás tartományában.

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left[\frac{\eta_0(T) \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right]^{(1-n)}} \quad (6)$$

Látható, hogy itt nincs különbség az egyszerű Cross egyenlethez képest, viszont az η_0 számításánál már jelen van a WLF tag miatti eltérés. Az a_T hőmérséklet eltolási tényező könnyen felismerhető a nullvizkozitás egyenletében, ahol az általános képlet C_1, C_2 konstansait itt az A_1 és A_2 konstans helyettesíti.

$$T \geq \tilde{T} \rightarrow \eta_0(T, p) = D_1 \cdot \exp \left\{ \frac{-[A_1 \cdot (T - \tilde{T})]}{[A_2 + (T - \tilde{T})]} \right\}$$

$$T < \tilde{T} \rightarrow \eta_0(T, p) = \infty \quad (7)$$

, ahol :

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 \cdot p$$

$$\tilde{T} = D_2 + D_3 \cdot p$$

Észrevehető, hogy a nullvizkozitást befolyásolja a nyomás is, ami a legtöbb esetben csak látszat, mivel a D_3 -as konstans a legtöbb esetben nullának választható, ezáltal a \tilde{T} azonos a D_2 konstanssal.

Polimerek fajtérfogat-változása

Spencer és Gilmore [9] írták le először, hogy a polimer ömledék állapotátározóit a termodinamikából ismert gáztörvényhez hasonló egyenletbe foglalhatjuk:

$$(p + \pi)(v - \omega) = \frac{RT}{M} \quad (8)$$

ahol p a hidrosztatikus nyomás, v a fajtérfogat, R az egyetemes gázállandó, T az abszolút hőmérséklet, M a polimerlánc monomer-egységének móltömege, π az anyagra jellemző nyomáskorrekciós állandó és ω a makromolekula saját térfogatát figyelembe vevő korrekciós állandó [10].

Ez a leírás mód ugyan szemléletesen, hiszen valós fizikai jellemzőkkel írja le a fajtérfogat alakulását a hőmérséklet és a nyomás függvényében, azonban matematikai szempontból nehezen

kezelhető, a szimulációs programba való implementálása nem megoldható.

Ennél a leírásnál egy jóval gyakorlatiasabb leírást ad a kéttartományú Tait egyenlet, amelyet a fröccsöntési szimulációs rendszerek is alkalmaznak [11, 12, 12]:

$$v(T, p) = v_0(T) \left[1 - C \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right] + v_t(T, p) \quad (9)$$

ahol $v(T, p)$ a fajtérfogat az adott hőmérsékleten és nyomáson, $v_0(T)$ a fajtérfogat környezeti nyomáson, T a hőmérséklet, p a nyomás, C egy 0,0894 értékű konstans és B a nyomás-érzékenységi tényező.

Az alsó, illetve a felső hőmérséklettartományt a T_t átmeneti hőmérséklet választja el, amely a nyomás függvényében a következőképpen változik:

$$T_t(p) = b_5 - b_6 p \quad (10)$$

ahol b_5 és b_6 konstansok.

– A felső hőmérséklettartományban, ahol a hőmérséklet nagyobb, mint az átmeneti hőmérséklet ($T > T_t$):

$$v_0(T) = b_{1m} + b_{2m}(T - b_5) \quad (11a)$$

$$B(T) = b_{3m} \exp[-b_{4m}(T - b_5)] \quad (11b)$$

$$v_t(T, p) = 0 \quad (11c)$$

ahol $b_{1m}, b_{2m}, b_{3m}, b_{4m}$ és b_5 konstansok.

– Az alsó hőmérséklettartományban, ahol a hőmérséklet kisebb, mint az átmeneti hőmérséklet ($T < T_t$):

$$v_0(T) = b_{1s} + b_{2s}(T - b_5) \quad (12a)$$

$$B(T) = b_{3s} \exp[-b_{4s}(T - b_5)] \quad (12b)$$

$$v_t(T, p) = b_7 \exp((b_8(T - b_5) - (b_9 p))) \quad (12c)$$

ahol $b_{1s}, b_{2s}, b_{3s}, b_{4s}, b_5, b_6, b_7, b_8$ és b_9 konstansok.

Anyagvizsgálatok

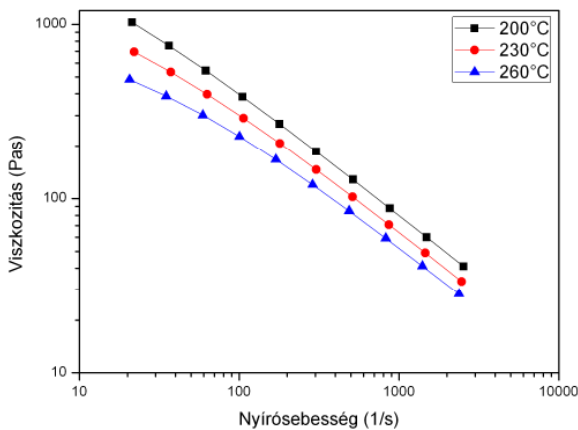
Kutatásaink során 10, 20 és 30 m% üvegszál erősítésű PP-t (Borealis Daplen HD120MO) hoztunk létre Brabender Plasticorder 814402 típusú kétcsigás extruderen konstans csigasebesség mellett. Az extrudátumból Brabender granuláló segítségével állítottunk elő granulátumot. Mivel ezek saját gyártású alapanyagok, nem találhatók meg a fröccsöntési szimulációs program adatbázi-

sában, amelyet oda csak saját mérések alapján lehet feltölteni adott formában.

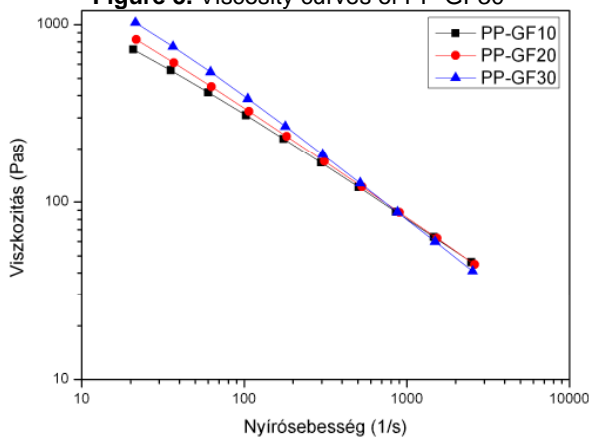
Viszkózitásmérés

Az MFI értékének meghatározását CEAST Modular Melt Flow 7027.000 típusú MFI berendezésen végeztük 230°C-on, 2,16 kg-os terhelés mellett. A három alapanyag, PP-GF10, PP-GF20 és PP-GF30, MFI értéke rendre 5,1, 3,9, és 3,1 g/10 min volt.

Mivel a folyási mutatószám nem alkalmazható szimulációk esetén, ezért viszkózitásmérést végeztünk Zwick Z050 típusú, számítógép vezérelésű szakítógépre szerelt kapillár viszkóziméterrel. A méréseket 3 különböző kapillárisshozsal, 200, 230 és 260°C-on mértük a következő sebességek mellett: 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 mm/min. A 3. ábra a 30 m% üvegszál erősítésű PP viszkózitását mutatja három hőmérsékleten, míg a 4. ábra az eltérő üvegszáltartalom viszkózitására gyakorolt hatását mutatja 200°C-on. Látható, hogy az anyag viszkózitása a várt módon a hőmérséklet növekedésével csökkent, a száltartalom növelésével pedig nőtt.



3. ábra PP-GF30 viszkózitásgörbéi
Figure 3. Viscosity curves of PP-GF30



4. ábra Különböző mértékben szálerősített PP viszkózitásgörbéje 200°C-on

Figure 4. Viscosity curves of PP with different glass fibre contents at 200°C

A nyers mérési eredményekre támaszkodva a pontokra illesztett viszkózitásgörbék alapján meghatározásra kerültek az alapanyagokhoz tartozó Cross-WLF egyenlet (6) szükséges konstansai, amelyeket az 1. táblázat foglal össze.

	PP-GF10	PP-GF20	PP-GF30
$n [-]$	0,3856	0,3604	0,2528
$\tau^* [\text{Pa}]$	5853,21	7902,43	26678,2
D1 [Pas]	$1,3969 \cdot 10^{16}$	$3,60286 \cdot 10^{12}$	$1,26132 \cdot 10^{14}$
D2 [K]	263,15	263,15	263,15
D3 [K/Pa]	0	0	0
A1 [-]	29,801	25,33	30,682
A2~ [K]	51,6	51,6	51,6

1. táblázat PP alapanyagok Cross-WLF paraméterei
Table 1. Cross parameters of PP with different fibre contents

A definiált konstansokkal a Cross-WLF egyenlet PP-GF30 esetén (13) szerint alakul:

$$T \geq \tilde{T} \rightarrow \eta_0(T, p) = 1,26132 \cdot 10^{14} \cdot \exp \left\{ \frac{-[30,682 \cdot (T - \tilde{T})]}{[51,6 + (T - \tilde{T})]} \right\}$$

$$T < \tilde{T} \rightarrow \eta_0(T, p) = \infty$$

, ahol :

$$A_2 = 51,6$$

$$\tilde{T} = 263,15.$$

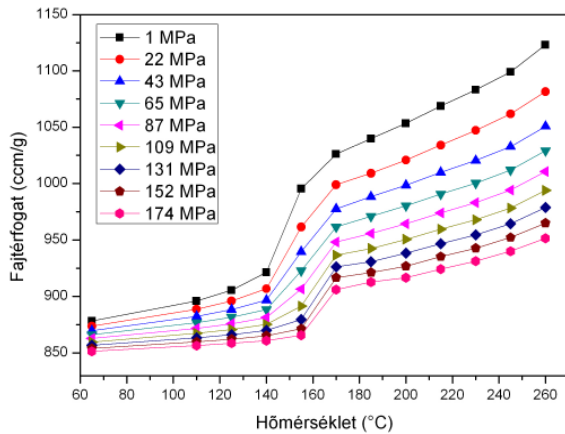
(13)

pVT mérés

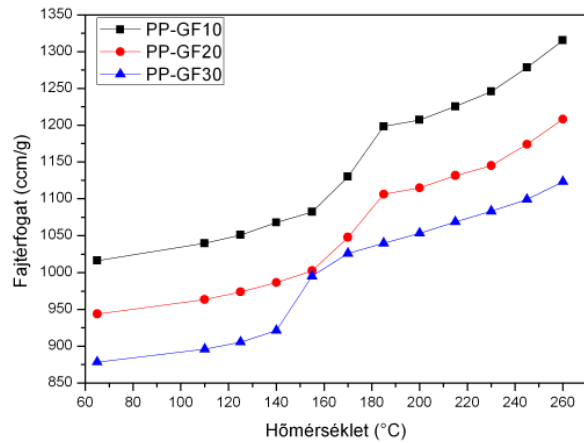
Az alapanyagok fajtérfogat-változását Göttfert Rheograph 75 típusú kapillár reométerrel vizsgáltuk, mindhárom alapanyag esetén 8 nyomás (10-175 MPa) és 12 hőmérsékleti érték mellett (65-260°C). A PP-GF30 fajtérfogat-változását az 5. ábra szemlélteti. Megfigyelhető, hogy a várt módon az üvegszáltartalom növekedésével azonos nyomás mellett csökkent a polipropilén fajtérfogata (6. ábra).

A mért értékek alapján, görbeillesztéssel kerültek a Tait egyenlet konstansai meghatározásra, amelyeket a 2. táblázat tartalmaz.

Ezekkel a konstansokkal a (10)-(12) kifejezések az adatillesztés alapján PP-GF30 esetén a következők szerint (14)-(16) alakulnak:



5. ábra PP-GF30 pvT görbéje
Figure 5. pvT curves of PP-GF30



6. ábra Különböző száltartalmú PP alapanyagok fajtérfogat-változása 1 MPa nyomáson
Figure 6. pvT curves of PP with different glass fibre contents at a pressure of 1 MPa

	PP-GF10	PP-GF20	PP-GF30
b_5 [K]	432,15	432,15	432,15
b_6 [K/Pa]	$7,6 \cdot 10^{-8}$	$7,9 \cdot 10^{-8}$	$1,245 \cdot 10^{-7}$
b_{1m} [m^3/kg]	0,001185	0,001102	0,001017
b_{2m} [m^3/kgK]	$1 \cdot 10^{-6}$	$1,082 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
b_{3m} [Pa]	$7,01244 \cdot 10^7$	$6,59553 \cdot 10^7$	$6,28106 \cdot 10^7$
b_{4m} [1/K]	0,006854	0,005768	0,004323
b_{1s} [m^3/kg]	0,001049	0,0009814	0,0009031
b_{2s} [m^3/kgK]	$3,119 \cdot 10^{-7}$	$3,73 \cdot 10^{-7}$	$2,605 \cdot 10^{-7}$
b_{3s} [Pa]	$2,48835 \cdot 10^8$	$2,03556 \cdot 10^8$	$2,32132 \cdot 10^8$
b_{4s} [1/K]	0,001543	0,005795	0,00623
b_7 [m^3/kg]	0,0001358	0,0001205	0,0001137
b_8 [1/K]	0,1183	0,1246	0,05476
b_9 [1/Pa]	$1,513 \cdot 10^{-8}$	$1,618 \cdot 10^{-8}$	$1,346 \cdot 10^{-8}$

2. táblázat PP alapanyagok Tait paramétereit
Table 2. Tait parameters of PP with different fibre contents

$$T_i(p) = 432,15 - 1,245 \cdot 10^{-7} p, \quad (14)$$

- A felső hőmérséklettartományban:

$$v_0(T) = 0,001017 + 10^{-6} \cdot (T - 432,15), \quad (15a)$$

$$B(T) = 6,281 \cdot 10^7 \exp[-0,004323 \cdot (T - 432,15)], \quad (15b)$$

$$v_t(T, p) = 0, \quad (15c)$$

- Az alsó hőmérséklettartományban

$$v_0(T) = 0,0009031 + 2,605 \cdot 10^{-7} (T - 432,15), \quad (16a)$$

$$B(T) = 2,32132 \cdot 10^8 \exp[-0,00623(T - 432,15)], \quad (16b)$$

$$v_t(T, p) = 0,0001137 \exp((0,05476 \cdot (T - 432,15)) - (1,346 \cdot 10^{-8} p)). \quad (16c)$$

Hőtani jellemzők

A polimerek hőtani tulajdonságainak ismerete is szükséges a modellekhez, azonban ezekre nem léteznek külön függvények. Ezek a jellemzők a hőmérséklet függvényében változnak, értékük táblázatos formában adható meg. Ilyen szükséges anyagjellemző a hővezetési tényező, a fajhő, illetve a kristályosodási hőmérséklet. A hővezetési tényező meghatározására úgynevezett hot-plate méréssel nyílik lehetőség.

A fajhő azt a képességét jellemzi, mekkora hőbevitel közlése szükséges a polimerrel ahhoz, hogy az bizonyos hőmérsékletemelkedést érjen el, amely meghatározása DSC mérésel lehetséges. Szintén DSC mérésel állapítható meg a polimer kristályosodási hőmérséklete, amely a kidobási hőmérséklet meghatározásához szükséges. Ennek a két jellemzőnek a meghatározását Perkin-Elmer DSC-2 típusú pásztázó kaloriméterrel határoztuk meg. A fűtési program 320 K-ről 500 K-re történő 20°C/perc sebességű felfűtéssel indult, amit 2 perces hőtartás követett, majd 20°C/perc sebességű visszahűtést ismét azonos sebességű 500 K-re való felfűtés követett. PP-GF10, PP-GF20 és PP-GF30 kristályosodási hőmérsékletét rendre 114, 115 és 115°C-nak adódott, fajhőjük 2800, 2432 és 1758 J/kgK volt.

Összefoglalás

Munkánkban célul tűztük ki, hogy az általunk gyártott 10, 20, ill 30 m% üvegszál tartalmú PP szimulációs programba való importálását elvégezzük. A különböző alapanyagok fröccsöntési szimulációkban való alkalmazásához az anyagtulajdonosságok mérési eredmények alapján történő matematikai modellezésére, a hozzájuk kapcsolódó konstansok definiálására, és azok szoftveres illesztésére volt szükség. Ehhez az anyagok feldolgozási jellemzőit határoztuk meg, többek közt a viszkozitását, a fajtér fogat-változását és hőtani jellemzőit. A kapott eredmények alapján létrehoztuk az alapanyagok matematikai modelljeit.

Köszönetnyilvánítás

A cikk a Bolyai János Kutatási ösztöndíj támogatásával készült. Köszönjük továbbá az Arburg Hungária Kft-nek az Arburg Allrounder 320C 600-250 típusú fröccsöntőgépet.

Irodalomjegyzék

1. Dunai A., Macskási L.: Műanyagok fröccsöntése, Lexica Kft., Budapest, 2003
2. J. P. Beaumont, R. Nagel, R. Sherman: Successful injection molding, Hanser Publishers, Munich, 2002
3. J. Shoemaker: Moldflow Design guide, Hanser Publishers, Munich, 2006
4. P. Kennedy: Flow analysis of injection molds, Hanser Publishers, Munich Vienna New York, 1995
5. Kovács J. G.: Fröccsöntő szerszám üregének kitöltését szimuláló programok összehasonlító elemzése, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika és Textiltechnológia Tanszék, Diplomamunka, 2000
6. Kovács J. G.: Fröccsöntési technológia tervezése és modellezése számítógépes szimulációs programmal, Műanyag és Gumi, 37/9, 2000, 316-325
7. Kovács J. G.: Fröccsöntési szimulációs programok elemzése, Műanyag és Gumi, 38/9, 2001, 350-358
8. Y. K. Shen, P. H. Yeh, J.S. Wu: Numerical simulation for thin wall injection molding of fiber-reinforced thermoplastics, International Communications in Heat and Mass Transfer, 28, 2001, 1035-1042
9. R. Spencer, G. Gilmore: Journal of Applied Polymer Science, 20, 1949, 502
10. R. C. Progelhof, J. L. Throne: Polymer engineering principle, properties, processes, tests for design, Hanser Publishers, Munich, 1993
11. T. A. Osswald, L.-S. Turng, P. J. Gramann: Injection molding handbook, Hanser Publishers, Munich, 2001
12. Moldflow Plastics Insight Help, Moldflow Corporation, 2005
13. J. G. Kovács: Injection molding and simulation using short fiber reinforced materials, Abstracts of Conference on Reinforced Materials 2002, Balatonfüred, Hungary, 2002, p5