



Miskolci Egyetem

Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori
Iskola

Vezetője: Dr. Roósz András egyetemi tanár, MTA rendes tagja

*Műanyag ömledékek nagysebességű áramlásának
tanulmányozása*

PhD dolgozat

Készítette:

Szűcs András

okleveles gépészmérnök

Témavezető:

Dr. habil. Belina Károly

egyetemi tanár

Kecskemét

2010

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
Jelölés- és rövidítésjegyzék.....	4
1 Bevezetés, az értekezés célja.....	7
2 Tudományos előzmények, kitűzött feladatok.....	9
3 Ömledék reológia alapjai	10
3.1 Folyásgörbék alaptípusai.....	11
3.2 Izoterm folyás matematikai leírása csövekben.....	13
3.2.1 Hatványtörvényt követő fluidum folyásának matematikai értelmezése	13
3.2.2 Bingham-féle képlékeny anyag folyásának matematikai értelmezése.....	16
3.3 Polimerek folyásának mechanizmusa	18
3.3.1 Polimer ömledékek szerkezete	19
3.3.2 Polimer ömledékek viselkedése newtoni folyástartományban.....	20
3.3.3 Polimer ömledékek viselkedése nemnewtoni folyástartományban.....	22
3.3.4 Nyújtó folyás	33
3.4 Polimer ömledékek nagyrugalmas tulajdonságai	38
3.4.1 Weissenberg-effektus	38
3.4.2 Reológiai duzzadás.....	39
3.4.3 Rugalmas turbulencia (ömledéktörés).....	40
3.4.4 Falcsúszás meghatározása	42
3.5 Végeselemes szimuláció, anyagmodellek	44
3.6 Méréstechnika	45
3.6.1 Szabványos mérőberendezések	45
3.6.2 Reológiai mérésre alkalmas rendszerek fejlesztése napjainkban.....	46
3.7 Irodalmi áttekintés kritikai értékelése	51
4 Kísérleti rész.....	52
4.1 Előkísérletek.....	52
4.1.1 Fröccsöntő szerszám üregnyomásának mérése	52
4.1.2 Spirálcsatornás szerszám.....	54
4.1.3 Réskapilláris szerszám	56
4.2 Felhasznált alapanyag	63
4.3 Felhasznált eszközök, technológia	63
4.4 Mérési körülmények, primer mérési adatok feldolgozása	66



4.5	Mérési eredmények kiértékelése	69
4.5.1	Nyíróáramban végrehajtott mérések	70
4.5.2	A kitöltési folyamat termikus vizsgálata	84
4.5.3	Nyújtási áramban végrehajtott mérések	87
5	Összefoglalás.....	92
5.1	Tézis pontok	92
6	Irodalomjegyzék.....	93
7	Új tudományos eredményekhez kapcsolódó publikációk	100
8	Mellékletek.....	104
8.1	Mérési adatok	104
8.1.1	Változó kapilláris magassággal végzett mérések eredményei	104
8.1.2	Nyíróviszkózitás számítása a különböző hosszúságú szerszámokra.....	113
8.1.3	Nyújtási áramban végzett mérések.....	117

Jelölés- és rövidítésjegyzék

τ :	Nyírófeszültség
τ_w :	Nyírófeszültség a falnál
A :	Felület
η, η_a :	Látszólagos viszkozitás
η_d :	Dinamikai viszkozitás
$\dot{\gamma}$:	Deformáció-sebesség
$\dot{\gamma}_w$:	Deformáció-sebesség a falnál
$\dot{\gamma}_{app}$:	Látszólagos deformáció-sebesség
ζ :	Képlékeny viszkozitási tényező
S_0 :	Folyási határfeszültség
F :	Erő
r :	Sugár
p :	Nyomás
v ,:	Sebesség
η_0 :	Maximális viszkozitás
n :	Nyírási érzékenység
Q :	Térfogatáram
N_A :	Avogadro szám
h_p :	Planck-állandó
V_M :	Móltérfogat
ΔG :	Folyás szabad entalpiája
R :	Egyetemes gázállandó
ΔH :	Folyás aktiválási hője (viszkózus folyás aktiválási energiája)
C :	Hőmérséklettől független állandó
β_0 :	Viszkozitás hőmérsékleti együtthatója
E_0 :	Folyás aktiválási energiája
B :	Hőmérsékletfüggő állandó
\bar{M}_m :	Átlagos tömegszerinti molekulatömeg
δ :	Viszkozitás nyomás függése

k, μ_0, μ_1	Viszkozitás dimenziójú anyagállandó
$\dot{\gamma}_{red}$	Redukált nyírósebesség
η_{red}	Redukált viszkozitás
α	A viszkozitás nyomás együtthatója nemnewtoni folyástartományban
τ_r	Karakterisztikus relaxációs idő
σ_E	Nyújtási feszültség
λ	Nyújtás
$\dot{\epsilon}$	Nyújtási sebesség
γ_e	Ömledék nagyrugalmas deformációja
σ_{\perp}	Normálfeszültség
e	Reológiai duzzadás mértéke
d_c	Polimer extrudátum átmérője
ρ	Sűrűség
ρ_c	Ömledék sűrűsége
$\dot{\gamma}_{true}$	Valós nyírósebesség
$\dot{\gamma}^*$	Átlagos nyírósebesség
A_i	Anyagi minőségtől függő állandó
γ_{f2}	Falhatással korrigált nyírósebesség a falnál
v_{cs}	Falcsúzás sebessége
Q^*	Falcsúzással korrigált térfogatáram
N_1	Első normálfeszültség-különbség
σ_a	Átlagos normálfeszültség
γ^x	Átlagos nyírósebesség
h	Áramlási keresztmetszet (rés) vastagsága
w	Áramlási keresztmetszet (rés) szélessége
L, l	Áramlási hossz
Gz	Graetz-szám
C_p	Állandó nyomáson mért fajhő
Na	Nahme-szám

$Br :$	Brinkman-szám
$k :$	Hőfokvezetési-együttható
$\alpha_\eta :$	n hőmérséklet függése
$a, b, f :$	Falhatást módosító tényezők
$T_a :$	Anyaghőmérséklet
$T_{sz} :$	Szerszámhőmérséklet
$v_{fcs} :$	Fröccsebesség

1 Bevezetés, az értekezés célja

Műanyagok az élet minden területén egyre nagyobb mennyiségben fordulnak elő: a kezdeti másodlagos alkalmazásukhoz képest ma már nélkülözhetetlen műszaki anyagok. Elegendő megemlíteni az elektronikát, számítástechnikát, csomagolóstechnikát vagy a járműipart; életünk elképzelhetetlen műanyagok nélkül. Az emelkedő minőségi elvárások a mérnököket új kihívásokkal állítják szembe, azaz egyre precízebb, bonyolultabb alkatrészeket méreteznek, terveznek, készítenek műanyagból. Nem ritka, hogy műanyagok fordulnak elő olyan területeken is, ahol néhány évvel ezelőtt elképzelhetetlen lett volna (biztonságtechnikai berendezések, fékrendszerek, terhelt gépelemek stb). Ezek a magas elvárások csak akkor teljesíthetők, ha pontosan ismerjük a feldolgozott alapanyag tulajdonságait [1].

A műanyagok nemlineáris viselkedésű viszkoelasztikus anyagok, deformációjuk matematikai leírása sokkal összetettebb egyenletekkel valósítható meg, mint a fémeké. A legelterjedtebb feldolgozás-technológiák (fröccsöntés, extrúzió, termoformázás stb.). alkalmazásával az alapanyag deformációját külső erőkkel hozzuk létre megfelelő hőmérsékleten, amelynek során létrejön a végtermék alakja és fizikai szerkezete. A berendezéseken beállítható paraméterek: az idő, a nyomás, sebesség, hőmérséklet, amelyek tulajdonképpen a reológia alapjellemzői.

A reológia a klasszikus mechanika új ágának tekinthető, bár a klasszikus mechanikán kívül más alap és leszármaztatott tudományra is épül. A reológiai vizsgálatok során a deformációk, és az ezeket létrehozó erők közötti törvényszerűségek, s ezek időfüggvényei, valamint e törvényszerűségeknek és függvényeknek a külső hőmérséklettől és nyomástól való függését vizsgáljuk. A műanyag ömledékek reológiai jellemzőit összetett és drága berendezésekkel tudjuk meghatározni, például kapilláris-, rotációs- és oszcillációs-reométerekkel, on-line extrúziométerekkel.

Az irodalomban megjelent publikációk alapján azt találtuk, hogy többen foglalkoztak azzal, hogy fröccsöntési technológiát használjanak reológiai mérésekre. I. Clavería, C. és Javierre, L. Ponz spirálcsatornás fröccsöntő szerszámot [2], Chun-Sheng Chen és szerzőtársai pedig mikroszatornás fröccsöntő szerszámot alkalmaztak folyási jellemzők tanulmányozására [3,4]. A hagyományostól eltérő elven működő mérőberendezések fejlesztése máig folyamatos, amelyekkel még több anyagtulajdonságot lehet meghatározni, pl. viszkozitás nyomás függését [5], nyújtási folyási jellemzőket [6-8], feszültségeloszlást az áramlási keresztmetszetben [9,10]. A fröccsöntő gép összetett, drága, azonban igen elterjedt berendezés. Véleményünk szerint viszonylag kis költséggel lehet készíteni olyan speciális, műszerezett, fröccsöntő

szerszámot, amellyel hőre lágyuló műanyagok áramlásakor végbemenő jelenségeket pontosan lehet tanulmányozni.

Dolgozatomban bemutatom az ömledék reológia alapegyenleteit, az eddigi legfőbb kutatási eredményeket. Ismertetem az általam tervezett speciális fröccsöntő szerszám tervezésének lépéseit, majd a szerszám működését. Végezetül egy jól ismert fóliafúváshoz alkalmazott alapanyag reológiai jellemzőinek meghatározásán keresztül (nyírási és nyújtási viszkozitás) mutatom be a jelenlegi berendezés alkalmazhatóságát és a fejlesztés lehetőségeit.

2 Tudományos előzmények, kitűzött feladatok

A Kecskeméti Főiskola GAMF Kar, Műanyag- és Gumitechnológiai Szakcsoport elsősorban műanyagfeldolgozási technológiákkal, a hozzájuk kapcsolódó alap és alkalmazott kutatásokkal, valamint végeeselemes modellezéssel foglalkozik [11-14]. A fröccsöntési technológiákhoz közvetlenül kapcsolódó kutatások már több évtizedes múltra vezethetők vissza. Számos publikáció született a szerszámfelület és a terméktulajdonság kapcsolatának vizsgálatában [15,16].

A kutatómunka kezdetekor egy cserélhető formalapos fröccsöntő szerszám álló-oldali formalapjába két nyomásjeladót építettünk és vizsgáltuk, milyen reológiai körülmények között történik a formaüreg leképezése. A méréseink során azt tapasztaltuk, hogy a szerszámkitöltés fázisában a két jeladó között a nyomáskülönbség mérhető volt. A mérési eredményekből számított folyási jellemzők jó közelítéssel egybe estek az MFI méréssel meghatározottakkal. A berendezéssel nyert tapasztalatok alapján készítettünk egy spirálcatornás fröccsöntő szerszámot, amelyet később kibővítettünk két nyomásérzékelővel. Ezzel az eszközzel már nagy nyírósebesség tartományban is tudunk mérni. A fejlesztés harmadik szakaszában egy fröccsöntő szerszámot alakítottunk át. A szerszám mozgóoldali formalapjába cserélhető betétes kapilláris rendszert, az álló oldalba pedig nyomásérzékelő szenzorokat építettünk be. Ez az eszköz is több fejlesztési lépcsőn ment keresztül, ameddig elértük, hogy széles nyírósebesség tartományban a mérési eredményeink a szabványos módon meghatározott folyási jellemzőkkel jó közelítéssel azonos értéket adjanak.

A hőre lágyuló polimer ömledékek folyási és rugalmas tulajdonságait a lehető legszélesebb vizsgálati paraméter tartományban célszerű meghatározni. A berendezés fejlesztését olyan irányba folytattuk, hogy a következő alapvető reológiai vizsgálatokra legyen alkalmas:

- egyszerű nyíróáram vizsgálata;
- egyszerű nyújtóáram vizsgálata;
- áramlási geometria (üreg) hatásának vizsgálata, korrekciók;
- anizoterm jelenségek vizsgálata;
- fröccsöntő szerszám kitöltésének tanulmányozása.

3 Ömledék reológia alapjai

A különböző anyagi rendszerek deformációs jellemzőivel foglalkozó tudományt a 1928-ban az Eastonban tartott konferencián Reiner és Bingham javaslatára nevezték el reológiának (Rheos logos, azaz folyástan). A reológia tárgyköre az anyagok alakváltozási törvényszerűséginek vizsgálata. A reológia az anyagokat reológiai állapotegyenlettel jellemzi, amely megadja az anyagra jellemző feszültség és deformáció összefüggéseit [17]. A reológia a klasszikus mechanika új ágának tekinthető, bár a klasszikus mechanikán kívül más alap és alkalmazott tudományra is épül.

Reológiai vizsgálatok során a deformációk és az ezeket létrehozó erők közötti összefüggések, s deformációk és az erő időfüggvényei, valamint e törvényszerűségeknek és függvényeknek a külső hőmérséklettől és nyomástól való függését vizsgáljuk.

A feldolgozás hőmérséklet-tartományában a polimer viszkózan folyó fizikai állapotban van. Az ömledék reológia elsősorban a feszültség-alakváltozási sebesség összefüggését vizsgálja. Az alkalmazott áramlástípus az egyszerű nyíró, illetve az egyszerű nyújtóáramlás.

Hőre lágyuló amorf szerkezetű polimerek (T_f) folyási hőmérséklet, kristályos szerkezetű polimerek az olvadási hőmérséklet (T_m) felett viszkózan folyó fizikai állapotba kerülnek. Az óriásmolekulájú anyagok viszkozitása jellemzően nagyságrendekkel nagyobb, mint a kismolekulájú anyagoké. Az ömledék állapotú műanyagok gombolyodott makromolekuláinak termikus energiája olyan nagy, hogy tömegközéppontjaik egymáshoz viszonyított helyzete külső erők hatására elmozdulhat, és így irreverzibilis deformáció, folyás jön létre. A molekulák alakja, gombolyodottsági foka a deformáció során megváltozik, azok részlegesen kiegyenesednek. A műanyagok fizikai szerkezete az áramlás során megváltozik és az így létrejött orientáció hatására az anyag viszkozitása jelentősen csökken.

A polimer ömledékek viszkozitásának és reológiai viselkedésének, valamint molekuláris szerkezeti tényezők (molekulatömeg, molekulatömeg-eloszlás), és a külső fizikai paraméterek (hőmérséklet, nyomás stb.) közötti kapcsolat megállapítása mind elméleti, mind gyakorlati szempontból nagyon fontos.

3.1 Folyásgörbék alaptípusai

Folyadékokban nyíróerő hatására állandó sebességű deformáció jön létre, amikor is a külső erő és a folyás során fellépő belső súrlódás között egyensúly alakul ki (1). Ha két A felületű síklap között, melyek egymástól mért távolsága dy , newtoni folyadékot helyezünk el, és a felső lapra f tangenciális erő hat, akkor a felső lap az erőhatás tartama alatt v sebességgel mozog (1. ábra). A csúsztató (nyíró) feszültségek a folyadékon keresztül átadódnak az alsó, mozdulatlan lapra, és a folyadék egyes rétegeiben egyenletesen változik a sebesség és dv/dy sebességgradiens alakul ki. Az ideálisan viszkózus vagy newtoni folyadékok esetén a sebességgradiens arányos a nyírófeszültséggel (2):

$$\tau = \frac{f}{A}, \quad (1)$$

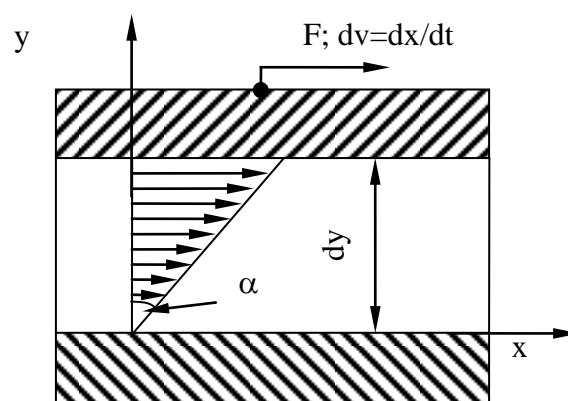
$$\frac{dv}{dy} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{f}{A} = \frac{1}{\eta} \cdot \tau, \quad (2)$$

ahol η a viszkozitás.

Az 1. ábra jelölésrendszerét használva az alábbi egyenlettel tudjuk a deformáció-sebességet definiálni kör keresztmetszetű résben (3):

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} = \frac{dx}{dy \cdot dt} = \frac{d\gamma}{dt}, \quad (3)$$

ahol dx a folyás irányába vett úthossz.



1. ábra. Sebességeloszlás két síklap között

A (2) egyenlet átalakítható a newtoni folyástörvény gyakrabban használt alakjára:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma} = \frac{1}{\eta} \cdot \tau, \quad (4)$$

A nyírósebesség (a folyási sebességgel és az áramlás geometriájával arányos) és a nyírófeszültség (az áramlást létrehozó erővel és a nyírt felülettel arányos tag) közötti összefüggés grafikus alakját folyásgörbének nevezzük.

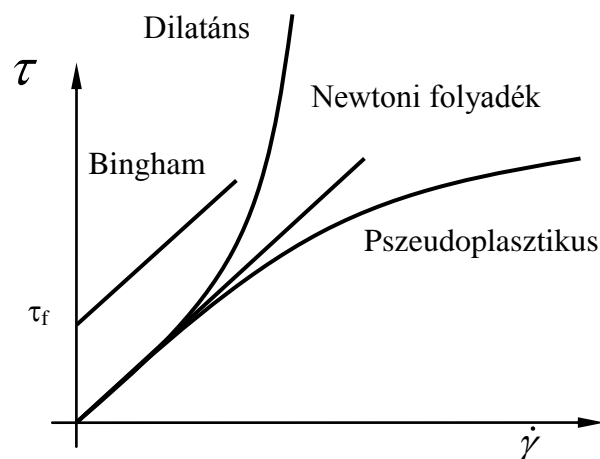
A newtoni folyadékok anyagállandója a viszkozitás, ami a hőmérséklettől és a nyomástól függ. A reális folyadékok az ideálistól több vonatkozásban is eltérhetnek:

- A deformáció-sebesség és a nyírófeszültség közötti kapcsolat nemlineáris.
- A folyási tulajdonságok időfüggőek.
- A folyás csak meghatározott nyírófeszültségtől indul el.

A nemnewtoni anyagok esetén fontos a látszólagos viszkozitás (η_a) fogalmát bevezetni, ami az effektív nyírófeszültség és a deformáció-sebesség hányadosa (5):

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

A dilatáns anyagok látszólagos viszkozitása nő, a pszeudoplasztikus anyagoké pedig csökken a deformáció-sebesség növekedésével (2. ábra). Mindkét esetben a viszkozitás változását az anyag fizikai szerkezetének változása okozza. A plasztikus anyagokra jellemző, hogy folyásuk, csak egy meghatározott folyáshatár (τ_f) felett indul meg (Bingham-féle plasztikus anyagok).



2. ábra. Folyásgörbék főbb típusai

A tixotróp és a reopektikus anyagok olyan pszeudoplasztikus anyagok, melyek viszkozitása függ az időtől.

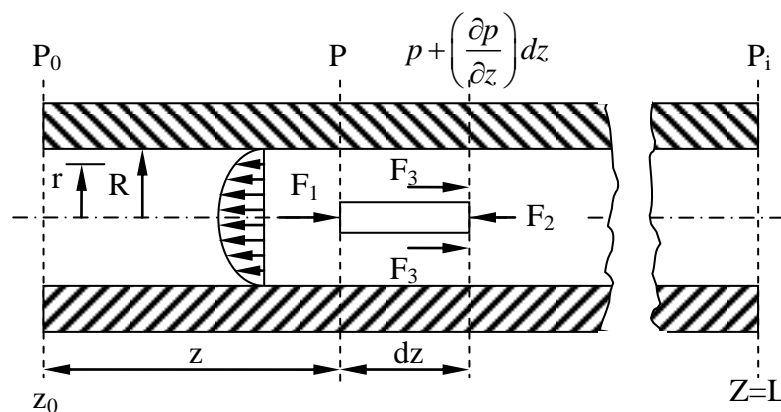
A műanyagok majdnem minden esetben pszeudoplasztikus anyagok, folyási jellemzőket a későbbiekben ismertetjük részletesen.

3.2 Izoterm folyás matematikai leírása csövekben

A folyásgörbék ismeretében érdemes kitérni a polimerek áramlásának leírására. A polimer ömledékek nagy viszkozitása miatt örvényléssel ritkán kell számolni, így többnyire lamináris folyás áll fenn. Az egyszerűség kedvéért összenyomhatatlan stacioner folyadékok (hatványtörvényt követő és Bingham-féle folyadékok) lamináris áramlását mutatjuk be. A folyás leírásakor feltételezzük, hogy az anyag nem csúszik meg a cső falán, továbbá, hogy viszkozitását a deformáció-sebesség és a hőmérséklet egyértelműen meghatározza.

3.2.1 Hatványtörvényt követő fluidum folyásának matematikai értelmezése

A folyadékminőségtől független nyírófeszültség sugárirányú függvénye-, az impulzus egyenletből- a folyadék minőségétől függetlenül levezethető [18], azonban szemléletesebb, ha a folyadékra ható erők egyensúlyának feltételéből indulunk ki (3. ábra).



3. ábra. Folyadék elemre ható erők egyensúlya csőben, stacioner, lamináris folyás közben
Mivel az áramlás stacioner, ezért a folyadék elemre ható erők eredőjének értéke nulla (6).

$$\sum F = 0 = F_1 + F_2 + F_3, \quad (6)$$

Az F_1 , F_2 , F_3 a bal, illetve jobb lapra, valamint a hengerpalástra ható erők, amelyekre a 3. ábra jelöléseinek megfelelően a (7), (8), (9) összefüggések írhatók fel.

$$F_1 = r^2 \cdot \pi \cdot p, \quad (7)$$

$$F_2 = -r^2 \cdot \pi \left(p + \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) dz \right), \quad (8)$$

$$F_3 = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot \tau_{rz} dz. \quad (9)$$

A fenti három egyenletet visszahelyettesítve a (6) egyenletbe megkapjuk a következő összefüggést (10):

$$\tau_{rz} = \frac{r}{2} \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right) \quad (10)$$

τ indexeit elhagyva és bevezetve $\dot{\gamma}$ -ot megkapjuk a newtoni folyadék egyszerű nyírásának már ismertetett egyenletét (5).

Hatványtörvényt követő folyadékokra az η viszkozitási tényező a $\dot{\gamma}$ deformáció-sebességgel a következő kapcsolatban van (11):

$$\eta = \eta_0 \cdot \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{n-1} \quad (11)$$

A levezetést mellőzve, fenti egyenletek alapján, a sugár menti áramlási sebesség gradiens a (12) egyenlet formájában írható fel:

$$v_z = v_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (12)$$

A cső tengelyében kialakuló áramlási sebesség (13):

$$v_0 = - \left(\frac{n \cdot R \cdot \dot{\gamma}_0}{n+1} \right) \left[\frac{R}{2 \cdot \eta_0 \cdot \dot{\gamma}_0} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad (13)$$

A negatív előjel negatív folyási irányt jelent. Kör keresztmetszetű csőben Q térfogatáram általában a következő összefüggéssel írható fel:

$$Q = 2 \cdot \pi \int_0^R r \cdot v_z \cdot dr \quad (14)$$

A (12) egyenletet a (14) egyenletbe helyettesítve és a jelzett integrálást elvégezve:

$$Q = \left(\frac{n+1}{3n+1} \right) \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_0 \quad (15)$$

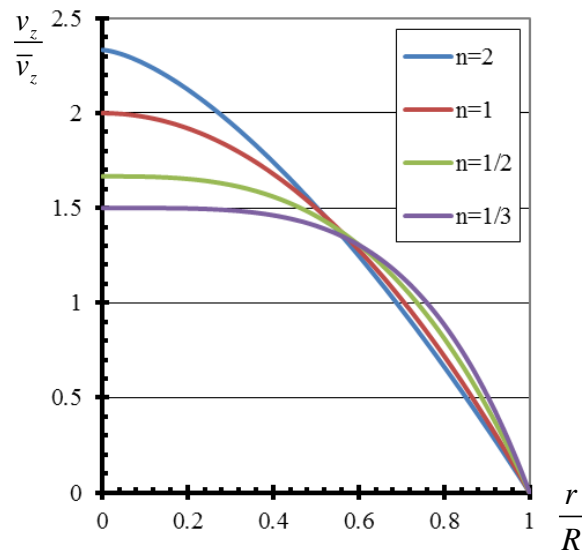
Az átlagos folyási sebességet definiálva (16):

$$\bar{v}_z = \left(\frac{n+1}{3n+1} \right) \cdot v_0 \quad (16)$$

a v_z helyi sebesség a következő formában írható fel:

$$v_z = \bar{v}_z \left(\frac{n+1}{3n+1} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (17)$$

A különböző n -hez tartozó sebességeloszlásokat a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra. Sebességeloszlás az áramlási cső keresztmetszetében

A fenti ábrából jól kitűnik, hogy a nyírési érzékenység (n) milyen nagymértékben befolyásolja az áramlási keresztmetszetben kialakuló áramlási profilt. Az $n=1$ feltétel esetén parabolikus sebességeloszlást kapunk, ami a newtoni folyadékokra jellemző. Az $n<1$ esetén a pszeudoplasztikus viselkedést mutató folyadékok sebességeloszlása látható a diagrammon. Műanyagok esetén jellemzően $0,2 < n < 0,9$. A görbéből következik, hogy az áramló ömledék viszkozitása a cső falához közeli részeken lecsökken és a tengelyvonalban a legnagyobb. A csőfalán ébredő nyírófeszültséget (τ_w) a (18), a falon ébredő deformáció-sebességet ($\dot{\gamma}_w$) pedig, a (19) egyenlettel adhatjuk meg:

$$\tau_w = \frac{R}{2} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right), \quad (18)$$

$$\dot{\gamma}_w = - \left(\frac{3n+1}{n} \right) \cdot \frac{Q}{R^3 \cdot \pi} \quad (19)$$

A (19) egyenlet az ún. Rabinowitsch-egyenlet, amely lehetővé teszi az anyagmodellől független deformáció-sebesség meghatározását [19].

3.2.2 Bingham-féle képlékeny anyag folyásának matematikai értelmezése

A fenti gondolatmenetet nyomon követve érdemes kitérni a Bingham-féle plasztikus anyag stacioner, izotermikus folyására vízszintes kör keresztmetszetű csőben. A Bingham-féle képlékeny anyag reológiai egyenlete azon a feltevésen alapul, hogy az anyag egy bizonyos feszültséghatárig teljesen mereven viselkedik (2. ábra), ezután pedig newtoni folyadékként viselkedik. A Bingham-féle anyagot az alábbi reológiai egyenletekkel lehet jellemezni:

$$\dot{\gamma} = 0 ; |\tau| \leq S_0, \quad (20)$$

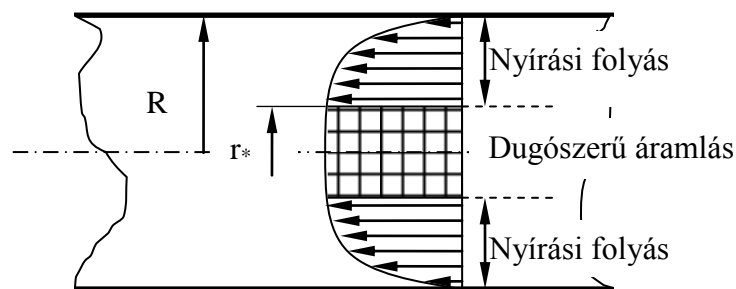
$$(\tau - S_0) = \zeta \cdot \dot{\gamma} ; |\tau| > S_0, \quad (21)$$

ahol ζ paraméter (képlékeny viszkozitási tényező) az anyag folyási tulajdonságait jellemzi;

S_0 a folyási határfeszültség.

A (18) egyenlet általános alakját összevetve a (21) egyenlettel megkapjuk a (22) összefüggést. Az egyenletben jól látható, hogy csak a nyírási folyás tartományra érvényes, amelyben a nyírófeszültség nagyobb, mint a határfeszültség. A sebességeloszlást az áramlási keresztmetszetben a 5. ábra szemlélteti, ahol a nyírás folyástartománya az $r^* < r < R$:

$$\frac{\partial v_z}{\partial r} = \frac{r}{2 \cdot \zeta} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{S_0}{\zeta}, \quad (22)$$



5. ábra. Bingham-féle közeg sebességeloszlása kör keresztmetszetű csatornában

A cső tengelyének környezetében, ahol $r \leq r^*$ a nyírófeszültség kisebb, mint a határfeszültség, az anyag „szilárd” és úgy viselkedik, mint a cső tengelyében mozgó dugó. A tengelytől r^* távolságra a nyírófeszültség (τ) egyenlő a határfeszültséggel (S_0), így a (23) egyenlet írható fel:

$$r^* = \frac{2S_0}{p}, \quad (23)$$

ahol $p = \frac{\partial p}{\partial z}$.

A nyírási folyás tartományban a folyadék sebességét a (22) egyenlet integrálásával kapjuk:

$$v_z = -\frac{R^2}{4 \cdot \zeta} \cdot \left[I - \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \frac{R \cdot S_0}{\zeta} \cdot \left[I - \left(\frac{r}{R} \right) \right] \right] \quad (24)$$

A (24) egyenlet kielégíti a $v_z(R)=0$ határfeltételt. A dugó v^* sebességét a (24) egyenletből kapjuk a $r=r^*$ helyettesítéssel. Az $X = \frac{r^*}{R} = \frac{2S_0}{R \cdot p}$ dimenzió nélküli változót bevezetve, a dugó sebessége az alábbi formában írható fel:

$$v^* = -\frac{R^2}{4 \cdot \zeta} \cdot \left[I - X^2 + \frac{R \cdot S_0}{\zeta} \cdot [I - X] \right] \quad (25)$$

A Q térfogati folyási sebesség:

$$Q = \pi \cdot r^{*2} \cdot v^* + 2\pi \int_{r^*}^R r \cdot v_z dr \quad (26)$$

ahol, az első tag a dugóban levő anyag térfogatárama, a második pedig a nyíró folyásé. A (24) és (25) egyenletekből a v_z és v^* sebességet beírva kapjuk meg a (27) egyenletet:

$$Q = -\frac{R^4 \cdot \pi \cdot p}{8 \cdot \zeta} \cdot \left(I - \frac{4X}{3} + \frac{X^4}{3} \right) \quad (27)$$

Figyeljük meg, hogy $S_0=0$ esetén a Bingham-féle plasztikus anyag reológiai egyenlete a Newtontörvénybe megy át, és ebben az esetben a Poiseuille-féle törvénnyé egyszerűsödik (28):

$$Q = \frac{\Delta p \cdot R^4}{8 \cdot \eta \cdot L} \quad (28)$$

A fröccsöntő szerszámokat ún. kifejtő áramlással töltjük ki, amit a későbbiekben részletesen bemutatunk. A kitöltés jellege a Bingham-féle folyáshoz jól hasonlítható, mivel a gyártott termékek héjában a molekulák (és a szálal erősítő anyagok) az áramlás irányába orientáltak, a belső magja viszont orientálatlan, amit a dugószerű áramlás okoz.

A fenti levezetések alapján a reológiai jellemzők meghatározásához nélkülözhetetlen egyenletek más keresztmetszetű csatornák esetére is levezethetőek [18].

3.3 Polimerek folyásának mechanizmusa

A folyadékok részecskéi a közeli rendezettség által determinált egyensúlyi állapotok körül rezegnek, esetleg új egyensúlyi állapotba ugranak át. Az átrendeződést az ún. lyukak teszik lehetővé, melyeknek összmenyisége a szabad térfogattal egyenlő. A szabad térfogat mellett lényeges a részecskék termikus energiája, mivel ez küzdi le az energiagátakat, mikor a részecske az egyik egyensúlyi állapotból a másikba kerül.

A folyás molekuláris elméletét Eyring és Frenkel dolgozta ki, és alapelveiben az abszolút reakciósebességek elméletével egyezik meg. Az Eyring-Frenkel-féle elmélet a viszkozitást a (29) egyenlettel írja le:

$$\eta = \frac{h_p \cdot N_A}{V_M} \cdot e^{\frac{\Delta G}{R \cdot T}} \quad (29)$$

ahol N_A Avogadro állandó;

h_p Planck állandó;

V_M móltérfogat;

ΔG a folyás szabadentalpiája;

R egyetemes gázállandó;

A jól ismert szabadentalpia függvény:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (30)$$

A folyás során fellépő entrópiaváltozás kellően nagy szabad térfogat esetén alig függ a hőmérséklettől, így a (29) és a (30) egyenlet az alábbi alakra hozható:

$$\eta = C \cdot e^{\frac{\Delta H}{R \cdot T}} = C \cdot e^{\frac{E_f}{R \cdot T}} \quad (31)$$

ahol ΔH a folyás aktiválási hője

E_f a folyás aktiválási energiája

C a hőmérséklettől független állandó.

A (31) egyenletből jól látszik, hogy a viszkozitás hőmérsékletfüggését az aktiválási energia határozza meg. Fontos megjegyezni, hogy a (31) egyenlet tulajdonképpen megegyezik a kémiai reakciók sebesség állandójának hőmérséklet függését leíró Arrhenius-egyenlettel.

A (31) egyenletnek megfelelően, a $\lg \eta$ az abszolút hőmérsékleti reciprok függvényében egyenest ad, amelynek hajlásszögéből ($\text{tg} \alpha$) meghatározható a folyás aktiválási energiája [20].

A folyás aktiválási energiája általában 9...40 kJ/mol érték.

Az alábbi összefüggés a (31) egyenletből meghatározható:

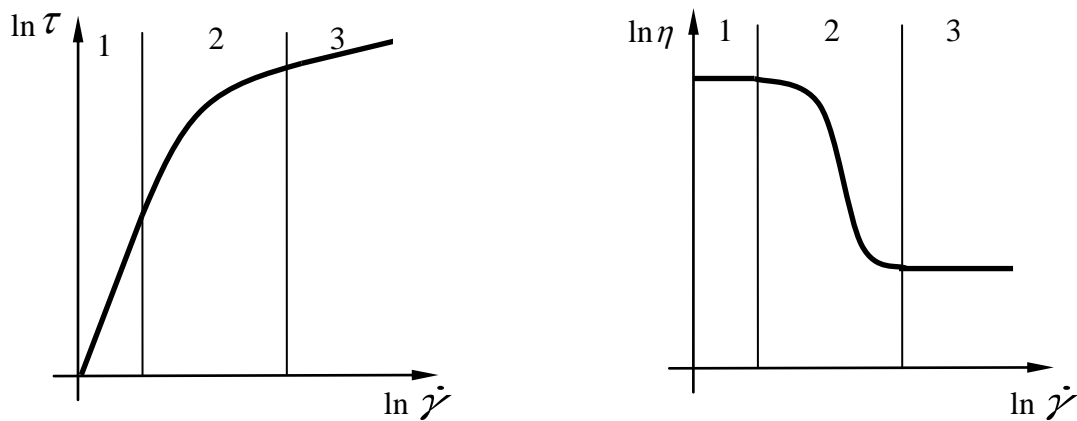
$$E_f = 2,303 \cdot R \cdot \lg \alpha \quad (32)$$

A (32) egyenlet kismolekulájú anyagok esetén széles hőmérséklet tartományban egyenest ad, azonban az elmélet nagymolekulájú folyadékok esetén nehezen értelmezhető. A polimerek folyása valójában nem az egész makromolekula egyidejű elmozdulásán alapul, hanem a molekulát alkotó láncszegmensek egymást követő átrendeződéséből tevődik össze, így a molekula tömegközéppontja a nyírófeszültség irányába mozdul. A mozgékony láncszakasz a statisztikus szegmens. Ennek megfelelően, ha a polimer lánc hossza kisebb, mint a szegmens hossza, a folyás aktiválási energiája a molekulatömeg függvénye, felette viszont függetlenné válik tőle. A statisztikus szegmenshossz és a folyás aktiválási energiája között egyértelmű kapcsolat van és mindkét mennyiség a lánchajlékonyságot jellemzi.

3.3.1 Polimer ömledékek szerkezete

A hőre lágyuló anyagok molekuláinak szerkezete lineárisnak, fonalszerűnek tekinthető. A szegmensmozgás következtében összegombolyodott és állandó termikus mozgásban levő láncok egymással összekuszálódnak és fizikai csomópontokat hoznak létre. Többek között ennek eredményeképpen alakul ki az úgynevezett fluktuációs háló. A háló dinamikus egyensúlyi mozgásban van, azaz egyes helyeken szétesik, más helyeken pedig létrejön. Amennyiben a folyási sebesség kicsi, akkor a háló egyensúlyi állapota gyorsan regenerálódik, azaz az anyag szerkezete megmarad és a viszkozitása állandó marad. A polimer ömledékek kis deformációsebesség-tartományban newtoni folyadékként viselkednek. A sebesség növekedésével azonban a fluktuációs háló egyre inkább szétesik és a molekulák gombolyodottsági foka csökken. Az áramlás hatására a molekulák a folyás irányába állnak be, orientálódnak. Ez a műanyagok viszkozitásának csökkenését eredményezi. A sebesség tovább növelésével a fluktuációs háló teljesen szétesik és a makromolekulák teljes mértékben orientálódnak, így eléri a legkisebb viszkozitásukat; ismét newtoni közegként viselkednek. A fentieknek megfelelően a polimer ömledékek folyásgörbéi három részre bonthatók (6. ábra):

1. newtoni folyás kis deformáció sebességnél (η_0 : maximális viszkozitás)
2. nemnewtoni folyástartomány
3. newtoni folyástartomány (η_∞ : minimális viszkozitás)



6. ábra. Reális polimer ömledék folyás- és viszkozitásgörbéje

A 6. ábra diagramjai igen nagy deformációsebesség-tartományt fognak át, ezért $\gamma - \tau$ összefüggést logaritmikus skálán szokták ábrázolni. A feldolgozása a második tartományban történik. η_0 értékét csak extrapolálással lehet meghatározni, mert kis sebességnél az anyag gyakran plasztikusan viselkedik. η_0 fontos anyagi jellemző és függ a molekulaszervezettől (molekulatömegtől és molekulatömeg-eloszlástól, láncelágazástól), molekuláris kölcsönhatásoktól és a fizikai tényezőktől (hőmérséklet, nyomás). Az η_∞ meghatározása gyakorlatilag kivitelezhetetlen, egyrészt mert a molekulák nagy mechanikai igénybevétele miatt az izoterm körülmények nem biztosíthatók, másrészt mert fellép a mechanikai lánc-tördelődés.

3.3.2 Polimer ömledékek viselkedése newtoni folyástartományban

η_0 függése a hőmérséklettől

η_0 meghatározása különböző paraméterek mellett nemcsak elméleti, hanem gyakorlati szempontból is nagyon fontos, mert bizonyos reológiai paraméterek meghatározásához szükséges az ismerete.

η_0 hőmérsékletfüggésének mennyiségi leírásához szükséges a viszkozitás hőmérsékleti együtthatóját (β_0) meghatározni:

$$\beta_0 = \frac{1}{\eta_0} \cdot \left(\frac{\partial \eta_0}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right) \quad (33)$$

A (31) egyenletet felhasználva β_0 és E_0 között a következő összefüggést állapíthatjuk meg:

$$\beta_0 = \frac{E_0}{R}, \quad (34)$$

ahol E_0 a folyás aktiválási energiája a newtoni folyástartományban.

Széles hőmérséklet tartományban (40...50°C) az $\eta_0 = f\left(\frac{1}{T}\right)$ ábrázolásban nem adnak egyenest, vagyis E_0 hőmérsékletfüggő. Ez egyrészt a lyukképződés aktiválási energiájának hőmérséklet függésével magyarázható, másrészt pedig azzal hozták kapcsolatba, hogy a hőmérséklet függvényében a polimer lánc mozgékony elemeinek mérete a láncok közötti kölcsönhatások változása miatt szintén változik. A polimerek viszkozitás-hőmérséklet függésének széles hőmérséklet-intervallumban való leírása nincs kielégítően megoldva. Számos empirikus és félempirikus összefüggés található az irodalomban, melyek többek között Fox, Loshaek, Doolittle és Vogel nevéhez fűződnek. E_0 értéke a polimer lánc hajlékonyságától, a láncok között ható szekunder erőktől és a lánc elágazottsági fokától függ.

η_0 függése a molekulatömegetől

Polimerek viszkozitása nagymértékben függ a molekulatömegetől, akár több nagyságrendű viszkozitás növekedést is eredményezhet a polimer lánc hosszának növekedése. A műanyagok aktiválási energiája (E_0) a szegmens méretétől, η_0 pedig a láncot alkotó szegmensek számától függ. Az η_0 és a molekulatömeg közötti összefüggést a (35) empirikus egyenlet határozza meg:

$$\eta_0 = B \cdot \bar{M}_m^a, \quad (35)$$

ahol \bar{M}_m az átlagos tömegszerinti molekulatömeg,

a kitevő, értéke 3,4 (a kritikus molekulatömeg felett),

B hőmérsékletfüggő állandó.

A nyomás hatása a viszkozitásra (η_0) a newtoni folyástartományban

A nyomás növekedésekor a folyadékok szabad térfogata csökken, ami a folyás mechanizmusának a szabad térfogat alapján való értelmezésének megfelelően, magával vonja a viszkozitás növekedését. Az ömledékek newtoni viszkozitásának nyomásfüggését a következő egyenlettel adhatjuk meg:

$$\eta_p = \eta_a \cdot e^{\delta \cdot p}, \quad (36)$$

ahol η_a, η_p az atmoszférikus és a p nyomáson mért viszkozitás,

δ állandó.

3.3.3 Polimer ömledékek viselkedése nemnewtoni folyástartományban

A nagy molekulatömegű polimer ömledékek newtoni folyástartománya igen kis deformáció-sebességig érvényes. A newtoni és a nemnewtoni folyástartomány közötti átmenethez tartozó nyírósebesség értékek a polimer szerkezetétől (molekulatömeg, molekulatömeg-eloszlás) és a hőmérséklettől függenek. A látszólagos viszkozitás értéke a deformáció-sebesség növekedésével akár több nagyságrendet is csökkenhet. Jelenleg a $\dot{\gamma} - \tau$ közötti kapcsolat formális leírásához különféle empirikus egyenletet alkalmazhatunk, amelyek a folyásgörbe egyes szakaszaira terjednek ki.

A gyakorlati számítások céljára a legelterjedtebb összefüggés az Ostwald-de Waele egyenlet, más szóval hatványtörvény, amely csak a nemnewtoni tartományban alkalmazható:

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (37)$$

ahol n és k kísérletileg meghatározandó konstansok.

Műanyagok esetén $n < 1$, és minél nagyobb az eltérés a newtoni viselkedéstől, annál kisebb az n értéke.

A (37) egyenletet logaritmizálva a folyásgörbék linearizálhatók:

$$\lg \tau = \lg k + n \cdot \lg \dot{\gamma}, \quad (38)$$

A hatványtörvényt felhasználva megadható a látszólagos viszkozitás:

$$\eta_a = k \cdot (\dot{\gamma})^{n-1}, \quad (39)$$

A levezetést mellőzve megadható a látszólagos- (η_a) és a differenciális viszkozitás (η_d) közötti kapcsolat (40):

$$n = \frac{\eta_d}{\eta_a}, \quad (40)$$

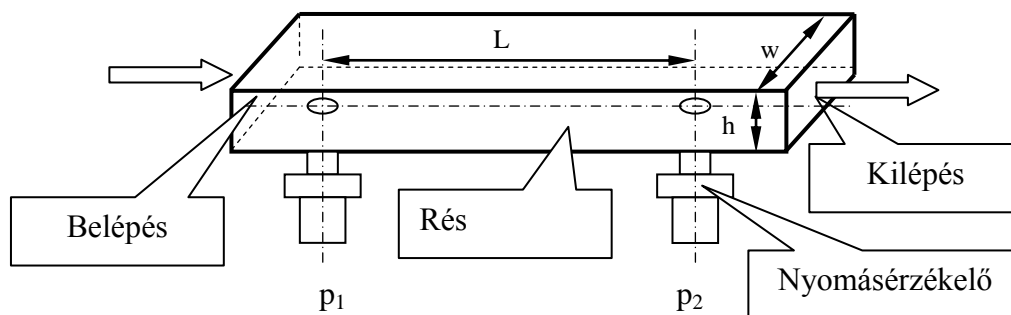
A k és n értékei csak a nyírófeszültség 2...3 nagyságrenden belüli változása esetén tekinthető állandónak.

Viszkozitás nyírósebesség függésének meghatározása

A polimerömlédek viszkozitás függvényének meghatározására számos technika létezik (3.6 fejezet). A kapilláris reométerekkel, jellemzően nemnewtoni folyástartományban tudunk dolgozni, melyekben kör, vagy réskapillárisokat használhatunk. A primer mérési adatokat felhasználva látszólagos értékeket kapunk, amelyek erősen függenek az alkalmazott kapilláris geometriájától. Ezért a látszólagos értékeket több korrekció alkalmazása után tekinthetjük valósnak, melyek a következők:

- a falhatást figyelembevevő számolás (réskapillárisok alkalmazásakor szükséges);
- a belépési és kilépési hatás figyelembe vétele a **Bagley korrekcióval**;
- a nem parabolikus sebesség eloszlás figyelembe vétele a **Weissenberg-Rabinowitsch korrekcióval**;
- a falcsúszás meghatározása a **Mooney analízissel**;
- a disszipációs hőfejlődés figyelembevétele;

Állandó és szabályozott térfogatáram mellett mérjük a kapilláris egy bizonyos L szakaszán a nyomáskülönbséget (7. ábra). A rés szélességét w , a vastagságát h betűvel szokás jelölni. Körkapillárisok sugarának jele: R .



7. ábra. Mérési elrendezés réskapilláris esetén

Réskapillárisokkal és két nyomásjeladóval végzett mérések esetén a korrigálatlan nyomásgradienst a P_1 és P_2 nyomásmérők által mutatott nyomás különbségéből:

$$\frac{\Delta P}{\Delta z} = \frac{P_1 - P_2}{L_1 - L_2}, \quad (41)$$

A korrigálatlan nyírófeszültséget pedig a nyomásgradiensből számítjuk [40, 69-74]:

$$\tau_f = \frac{h\Delta P}{2L} \quad (42)$$

A korrígalatlan nyírósebességet a térfogatáramból határozzuk meg [40, 69-74]:

$$\dot{\gamma}_f = \frac{6Q}{h^2W}. \quad (43)$$

Az összefüggések levezetésekor feltételezték [40, 69-74], hogy az áramlás stacioner és izoterm, a mért nyomásesés egészében a viszkózus folyás eredménye, a rés magassága jóval kisebb, mint a rés szélessége. Amennyiben az utóbbi feltételezés nem áll fenn, akkor figyelembe kell venni a rés szélességének hatását. A szélesség figyelembevételével a falnál ébredő módosított nyírófeszültség [75]:

$$\tau_w = \frac{h\Delta P}{2L} \left(\frac{l}{H/W + l} \right). \quad (44)$$

A falnál ébredő módosított nyírósebesség pedig:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{2}{3} \left(\frac{6Q}{h^2W} \right) \left(\frac{b}{f} + \frac{a}{f} \cdot \frac{1}{n} \right), \quad (45)$$

ahol az egyes állandók értékét az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Falhatást módosító tényezők [75])

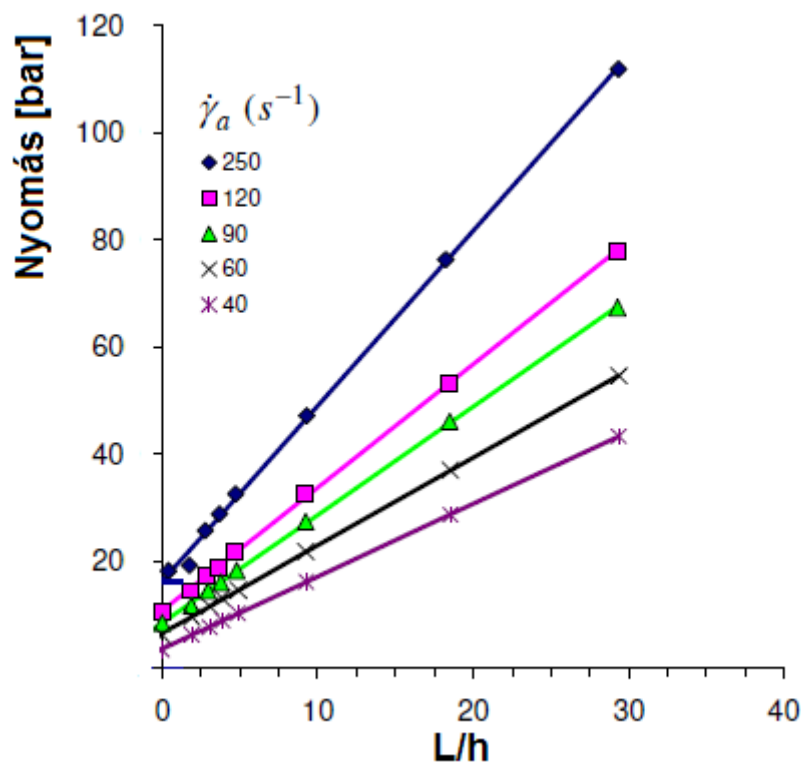
H/W	a	b	f
0	0,5	1	1
0,1	0,4132	0,9098	0,882
0,2	0,3475	0,8444	0,7946
0,3	0,2991	0,7954	0,7297
0,4	0,2659	0,7571	0,682
0,5	0,2439	0,7278	0,6478
0,6	0,2297	0,7065	0,6242
0,7	0,2208	0,6921	0,6085
0,8	0,2155	0,6831	0,5991
0,9	0,2129	0,6785	0,5942
1	0,2121	0,6771	0,5928

Az n a hatványkitevőt jelenti, amelyet a (46) összefüggésből határozzunk meg:

$$n = \frac{d \log \tau_f}{d \log \dot{\gamma}_f} \quad (46)$$

Az így kapott nyírófeszültségeket és nyírósebességeket használjuk a résekben bekövetkező belépési és kilépési nyomásvesztések, azaz a Bagley-korrekción meghatározására [76,77], melyhez különböző hosszúságú kapillárisokat használunk.

A nyírófeszültségekből a (42) egyenlet segítségével számítjuk az egyes szerszámokban bekövetkező nyomásesést, melyet L/h függvényében ábrázolva, a kapott egyenesek meredeksége $2\tau_f$, míg a tengelymetszet a ΔP_{be+ki} . (8. ábra)



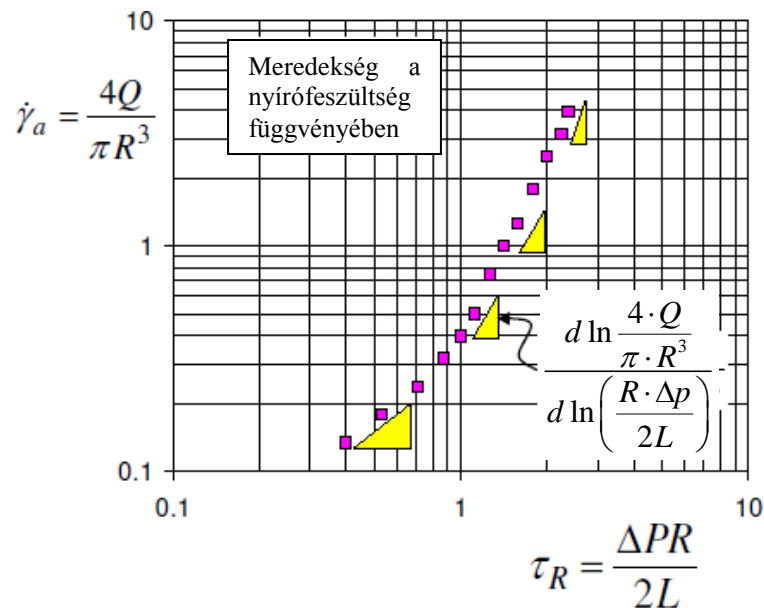
8. ábra. Bagley-korrekción elvi ábrája

A valós nyírósebességet a Weissenberg-Rabinowitsch korrekcióval tudjuk meghatározni, amelynek alakja körkapillárisra:

$$\dot{\gamma}_{kör} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3} \left[\frac{1}{4} \left(3 + \frac{d \ln \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3}}{d \ln \left(\frac{R \cdot \Delta p}{2L} \right)} \right) \right] \quad (47)$$

A (47) egyenlet első tagja a látszólagos deformáció-sebesség, a zárójelben levő tört pedig a korrekciós tag.

A 9. ábra mutatja a Weissenberg-Rabinowitsch-korrekciónak grafikus megoldását. A meredekség logaritmikus skálán állandó, és nagyobb 1-nél.



9. ábra. Példa a Weissenberg-Rabinowitsch-korrekciónak grafikus megoldására
Weissenberg-Rabinowitsch-korrekciónak réskapillárisra:

$$\dot{\gamma}_{rés} = \frac{6 \cdot Q}{h^2 \cdot w} \left[\frac{1}{3} \left(2 + \frac{d \lg \left(\frac{6 \cdot Q}{h^2 \cdot w} \right)}{d \lg \left(\frac{h \cdot \Delta p}{2L} \right)} \right) \right] \quad (48)$$

A Bagley-korrekciónal kapott nyírófeszültséget osztva a valós nyírósebességgel, megkapjuk a valódi nyíróviszkozitást.

Látszólagos viszkozitás (η_a) hőmérséklet függése a nemnewtoni folyástartományban

A viszkozitás hőmérsékletfüggését (33) egyenletnek megfelelően a viszkozitás hőmérséklet koefficiensével (β), vagy a folyás látszólagos aktiválási energiájával (E) jellemezhetjük. Mivel a nemnewtoni tartományban az anyag látszólagos viszkozitása τ és $\dot{\gamma}$ értékétől függ, ezért a η_a hőmérsékletfüggését τ =állandó, vagy $\dot{\gamma}$ =állandó érték mellett határozzák meg. Ennek megfelelően a $\eta_{a\tau}(T)$ és $\eta_{a\dot{\gamma}}(T)$ függvényekből kétfajta látszólagos aktiválási energia határozható meg. Kimutatható, hogy a kétfajta jellemző között a következő kapcsolat van:

$$\beta_\tau = \frac{\eta_a}{\eta_d} \beta_\dot{\gamma} = \frac{1}{n} \beta_\dot{\gamma} \quad (49)$$

$$E_{\tau} = \frac{\eta_a}{\eta_d} E_{\dot{\gamma}} = \frac{1}{n} E_{\dot{\gamma}} \quad (50)$$

Érdemes megjegyezni, hogy mivel $\eta_a > \eta_d$, ezért $\beta_a > \beta_d$.

A hatványtörvényben szereplő n értéke viszonylag kis mértékben függ a hőmérséklettől. 30°C-os hőmérséklet-tartományban állandónak tekinthető. Nyírósebesség csökkentésével és az anyag hőmérsékletének emelkedésével az n értéke növekszik, azaz a newtoni viselkedéshez közelít az anyag.

A látszólagos viszkozitás hőmérsékletfüggését Vinogradov és munkatársai általános formában oldották meg, az összefüggés a deformáció-sebességet és a relaxációs időspektrumot tartalmazza független változóként. A megfelelő egyszerűsítéseket követően a (51) egyenletet írták fel:

$$\eta_a(T) = \eta_0(T) f[\dot{\gamma}, \eta_0(T)] \quad (51)$$

Bevezetve a redukált viszkozitást és a redukált folyássebességet (52), (53):

$$\eta_{red} = \frac{\eta_a(T)}{\eta_0(T)} \quad (52)$$

$$\dot{\gamma}_{red} = \dot{\gamma} \cdot \eta_0(T) \quad (53)$$

Az f függvény jellege meghatározható, ha a kísérleti adatokat a $\eta_{red} = f(\dot{\gamma}_{red})$ formában ábrázoljuk. A η_{red} a rendszer eredeti szerkezetének megbontásának mértékét, a $\dot{\gamma}_{red}$ pedig a rendszerben uralkodó mechanikai igénybevétel intenzitását fejezi ki.

A fentiek alapján megállapítható, hogy a polimer ömledék folyási tulajdonságainak teljes leírásához a nem-newtoni tartományban elégséges a newtoni viszkozitás hőmérsékletfüggésének és az adott hőmérsékleten felvett $\dot{\gamma} - \eta_a$ összefüggésnek az ismerete.

Különböző polimerek folyásgörbéjének fenti módszerrel való értékelésekor arra a meglepő eredményre jutottak, hogy a kémiai szerkezettől függetlenül jó közelítéssel egy egyenesre esnek. Az általános viszkozitás egyenletet az (54) összefüggéssel adhatjuk meg:

$$\frac{\eta_0}{\eta_a} = 1 + 6,12 \cdot 10^{-3} \cdot (\dot{\gamma}_{red})^{0,355} + 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot (\dot{\gamma}_{red})^{0,71} \quad (54)$$

A függvény univerzális jellege azzal magyarázható, hogy a folyás során a makromolekulák deformációja kooperatív jellegű és a kémiai szerkezettől független.

A fentiek ismeretében megállapítható, hogy számítással a polimerek folyási karakterisztikájának meghatározása lehetővé válik széles hőmérséklet és mechanikai igénybevétel tartományban.

Látszólagos viszkozitás (η_a) nyomásfüggése

A feldolgozás körülményei között (fröccsöntés, extrúzió) az ömledék reológiai állapota a nemnewtoni folyás tartományában van és a kialakuló nyomások akár a 200 MPa-t is elérhetik. A nyomás hatásának jellemzésére a nemnewtoni folyástartományban a nyomás együtthatót vezették be (α). Értéke függ attól, hogy állandó deformáció-sebesség ($\alpha_{\dot{\gamma}}$), vagy állandó nyírósebesség (α_{τ}) mellett határozzuk meg.

Vizsgálták a különféle polietilének, a polipropilén és a polisztirol ömledékek viszkozitásának nyomásfüggését. A polietilén viszkozitása 5,6-szorosra nőtt, ha a nyomást 35 MPa-ról 175 MPa-ra növelték ($T=150\text{ °C}$, $\dot{\gamma}=500\text{ s}^{-1}$). Lényegesen nagyobb volt a polisztirol ömledékek nyomásérzékenysége. Polisztirol esetén az α_{τ} független a nyomástól, míg polietilénnél 1-200 MPa tartományban állandó, e fölött pedig csökken a nyomás növelésével.

Polimerek viszkozitásának nyomásfüggése jelenleg kevéssé vizsgált terület.

Fernández és munkatársai viszkoziméterrel és P-v-T mérőberendezéssel tanulmányozták PMMA, iPP, ABS, PC, PS és PA alapanyagok reológiai tulajdonságait [30]. A nyomás viszkozításra gyakorolt hatását Miller elméletével határozták meg [31].

$$\alpha = \frac{\partial \ln \eta_0}{\partial p}, \quad (55)$$

ahol α a viszkozitás nyomás együtthatója;

η_0 az anyag maximális viszkozitása;

p nyomás.

A modell gyakorlati alkalmazásához meg kell határozni az alapanyag P-v-T görbét és a η_0 hőmérsékletfüggését. A nyomás hatását tartalmazó Carreau-Yasuda-moddal széles deformációsebesség-tartományban leírhatók a polimer ömledékek folyási jellemzői:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0 \cdot e^{\alpha \cdot p}}{\left[1 + (e^{b \cdot p} \cdot \tau_r \cdot \dot{\gamma})^a\right]^{\frac{1-n}{a}}}, \quad (56)$$

ahol η_0 maximális nyíróviszkozitás;

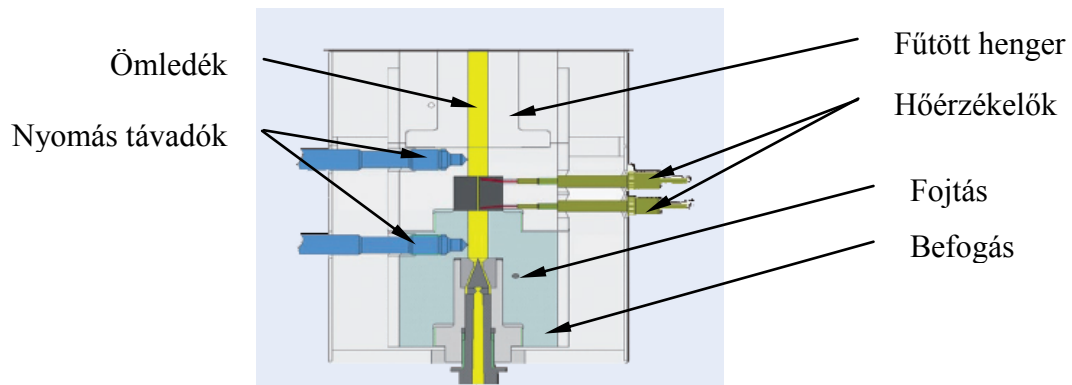
α nyomásérzékenység;

τ_r karakterisztikus relaxációs idő;

a, b módosító tag;

n nyírási érzékenység.

A 10. ábrán a Göttfert kapilláris reométer nyomás feltéte látható, ami 120 MPa túlnyomásig használható.



10. ábra. Göttfert kapilláris reométer elrendezése nyomás alatti viszkozitás méréséhez

A viszkozitás hőmérséklet – és nyomásfüggésének figyelembevétele

Laun [21-26] a kapillárisokon belül lejárlódó áramlási és termikus folyamatokat vizsgálta. Megállapította, hogy a nyomás és a disszipációs hő hatását nem lehet elhanyagolni nagysebességű reológiai vizsgálatok során. A belépési nyomásból, a hosszú kapillárisokkal végzett Bagley-korrekciókból és a nyomás alatt mért viszkozitási jellemzőkből határozzák meg a viszkozitás nyomásfüggését és a disszipációs hő nagyságát. A kapillárisokban lejátszódó áramlás végeselemes modellezésével szintén meghatározta a disszipációs hőfejlődést és a radiális hőmérsékleteloszlást.

A számításokhoz szükséges az előzőekben meghatározott viszkozitásgörbékből számított hatványtörvény állandóira (μ_1 és n):

$$\eta = \mu_1 \dot{\gamma}^{n-1} \quad (57)$$

Viszkozitás hőmérsékleti és nyomási tényezője (α_η és β_η):

$$\mu_1 = \mu_0 \exp(-\alpha_\eta |T^* - T_0|) \exp[\beta_\eta (P - P_0)] \quad (58)$$

ahol T_0 és P_0 a vonatkoztatási hőmérséklet és nyomás, és μ_0 az ezekhez tartozó viszkozitás egységnyi nyírósebességnél. T^* a rendszer termikus állapotától függ és a Graetz-szám alapján választható meg. A viszkozitás számításakor az (57) egyenletben az alábbi átlagos nyírósebességet használjuk:

$$\dot{\gamma}^* = \frac{Q}{4h^2 w} \quad (59)$$

A Graetz-szám a tengelyirányú hőszállítást hasonlítja össze a keresztirányú hővezetéssel:

$$Gz = \frac{2\rho C_p Qh}{kwL}, \quad (60)$$

ahol ρ az ömledék sűrűsége, C_p a fajhője, k a hővezetési tényezője. A Graetz-szám alapján választhatjuk meg T^* -ot a (58)-as egyenletben az alábbiak szerint [83,84]:

$$\begin{aligned} \text{ha } Gz \gg 1, \text{ akkor} \quad T^* &= T_{be}; \\ \text{ha } Gz \sim 1, \text{ akkor} \quad T^* &= (T_{be} + T_{fal})/2; \\ \text{ha } Gz \ll 1, \text{ akkor} \quad T^* &= T_{fal}. \end{aligned} \quad (61)$$

A Nahme-szám a disszipációs hőt és a viszkozitás jelentős változásához szükséges hőt hasonlítja össze:

$$Na = \frac{\eta Q^2 \alpha_\eta}{4kh^2 w^2}. \quad (62)$$

A disszipációs hőt és a környezetből történő hőáramot hasonlítja össze a Brinkman-szám:

$$Br = \frac{\eta Q^2}{4kh^2 W^2 |T_{be} - T_{fal}|}. \quad (63)$$

Amennyiben a $Na > 1$, úgy a disszipációs hő jelentős hatást gyakorol a viszkozításra. Ha a $Br > 1$, akkor a disszipáció jelentősebb, mint a belépési és falhőmérséklet különbségéből eredő hőáram, így az elhanyagolható. Nyilvánvalóan ez nem játszik szerepet akkor, amikor a belépési hőmérséklet azonos a falhőmérséklettel. A fröccsöntő szerszámokban végbemenő áramlások jellemző Graetz-száma ~ 1000 és a Nahme- valamint a Brinkman-szám $1 \dots 10$.

A következőkben Laun gondolatmenetét követve [21,22], az adiabatikus hőmérsékletemelkedés:

$$T(z) = T_{be} + \frac{(P_{be} - P)}{C_p(\rho_{be} - \rho)} \frac{z}{L}. \quad (64)$$

Ez az összefüggés valószínűleg nagyobb hőmérsékletnövekedést ad, mint a valóságosnál a keresztirányú hőáram elhanyagolása miatt. Feltételezzük, hogy ez a hőáram (ε_p) az alábbi egyenlettel írható le:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{\rho_0 \cdot \left(c_p + \frac{\Lambda}{Q} \right)}, \quad (65)$$

ahol Λ egy differenciális hőátadási tényező. Adiabaticus esetben $\Lambda=0$ (szigetelt fal). Állandó sűrűséget feltételezve a (64) egyenlet az alábbi alakú lesz:

$$\bar{T} - T_{be} = \varepsilon_p \cdot (P_{be} - P). \quad (66)$$

A (66) egyenletbe behelyettesítve a (65) egyenletet az alábbi összefüggést kapjuk:

$$\bar{T} - T_{be} = \frac{(P_{be} - P)}{\rho_0 C_p + \frac{\Lambda}{Q}}. \quad (67)$$

A hatványtörvényt követő ömledékre, a résben végbemenő áramlás nyírófeszültsége izoterm esetben [74]:

$$\tau_{f,0} = \frac{h}{2} \left[\frac{(2 + 1/n) 2^{1+1/n} \mu Q}{Wh^{2+1/n}} \right]^n. \quad (68)$$

A nyomásgradiens a viszkozitás hőmérséklet és nyomásfüggését figyelembe véve:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{2\tau_{d,0}}{h} \exp \left[-\alpha_\eta \varepsilon_p P_{be} + (\alpha_\eta + \beta_\eta) P \right], \quad (69)$$

ahol az $\varepsilon_p = \frac{1}{\rho_0 C_p + \frac{\Lambda}{Q}}$.

A (69) egyenletet integrálva kapjuk:

$$P(z) = P_{be} - \frac{1}{\beta_\eta + \alpha_\eta \varepsilon_p P} \ln \left[1 + 2\tau_{f,0} \frac{z}{h} (\beta_\eta + \alpha_\eta \varepsilon_p) \exp(\beta_\eta P_{be}) \right]. \quad (70)$$

A mérhető nyomáskülönbség:

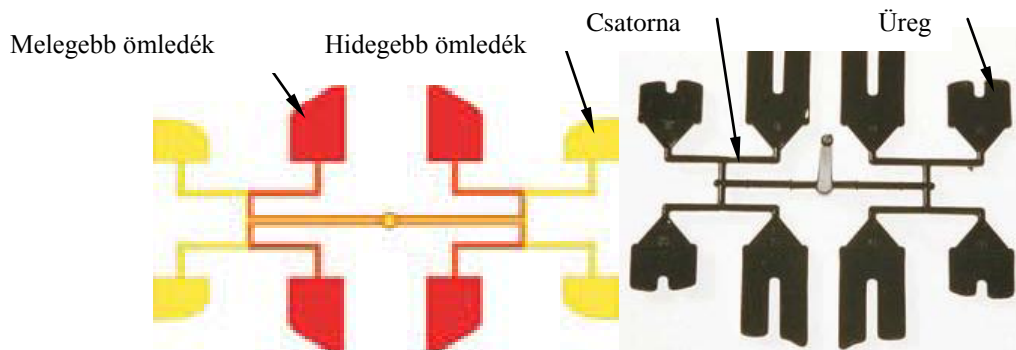
$$\Delta P = P_{be} - P_{ki} = \frac{1}{\beta_\eta + \alpha_\eta \varepsilon_p} \ln \left[1 + \Delta P_0 (\beta_\eta + \alpha_\eta \varepsilon_p) \exp(\beta_\eta P_{be}) \right], \quad (71)$$

ahol a ΔP_0 a nyomásesés, a hőmérséklet és nyomás viszkozításra gyakorolt hatása nélkül a (71) egyenlet közlíthető:

$$\Delta P \approx \Delta P_0 \exp(\beta_\eta P_{be}) \left[1 - (\beta_\eta + \alpha_\eta \varepsilon_p) \frac{\Delta P_0}{2} \exp(\beta_\eta P_{be}) \right]. \quad (72)$$

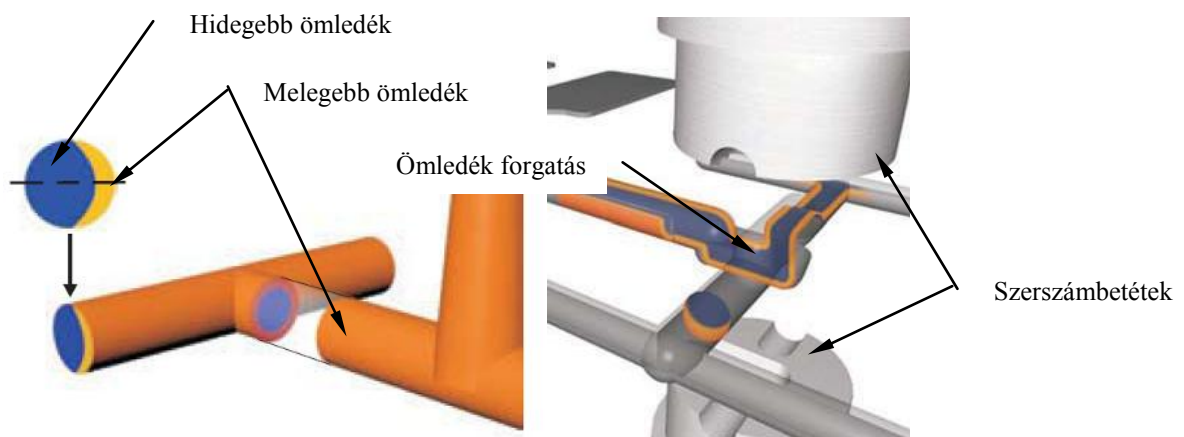
Az így számított nyomásesés figyelembe veszi a viszkozitás hőmérséklet- és nyomásfüggését.

Ipari gyakorlatban is tapasztalták, hogy teljesen szimmetrikus fészkelrendezés mellett is, a szerszámüregek eltérő sebességgel töltődnek bizonyos esetekben (11. ábra) [28].



11. ábra. Ipari példa a disszipációs hő fejlődésére (fészkek eltérő kitöltése)

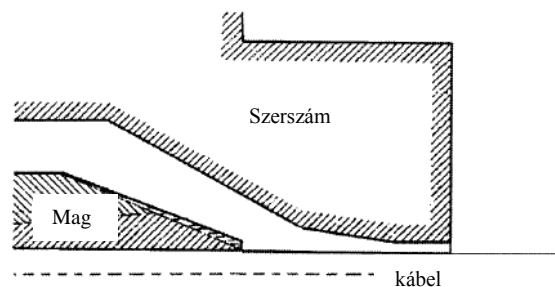
Az 12. ábrán jól látható a radiális hőmérsékleteloszlás a csatornában, hagyományos és ömledék forgatással kialakított csatornában [29]. A technológia, MeltFlipper MAXTM-ként ismert, amelyet fröccsöntő szerszámok hideg elosztócsatornájába lehet beépíteni.



12. ábra. Radiális hőmérséklet-eloszlás az elosztócsatornában (ömledék forgatás)

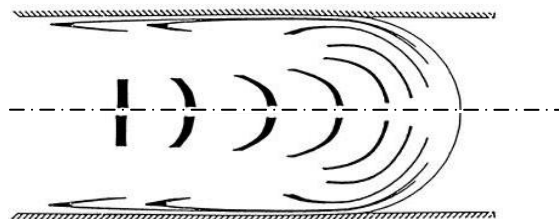
3.3.4 Nyújtó folyás

Ai viszkozitás alapvető jelentőségű minden olyan feldolgozási módszerben, ahol az ömledéket hossz- vagy keresztirányba orientálják (pl. fóliafűvés, fóliaöntés, palackfűvés, kábel bevonás, lemezgyártás stb.). Ezekben a nyújtási igénybevétel nagyobb is lehet, mint a nyírás [33]. A nyújtási igénybevétel azonban kisebb vagy nagyobb mértékben minden feldolgozási módszerben jelentkezik, ezért a nyújtási viszkozitás egyszerű meghatározása mindenképpen új távlatokat nyújt a feldolgozók számára. Binding munkatársaival egy huzalbevonó-szerszámban végbemenő nyíró- és nyújtóáramlás tanulmányozásával foglalkozott [34]. A 13. ábra egy kábelbevonó szerszám sematikus ábráját mutatja. A metszeten jól látható, hogy az áramlási keresztmetszet csökkenésével az áramló anyag nyújtást szenved. Az ömledéket jellemző Trouton-tényező a nyújtási és a nyírási viszkozitás hányadosa, értéke newtoni anyagoknál tengelyszimmetrikus áramlásban 3, síkáramlásban pedig 4 [35].



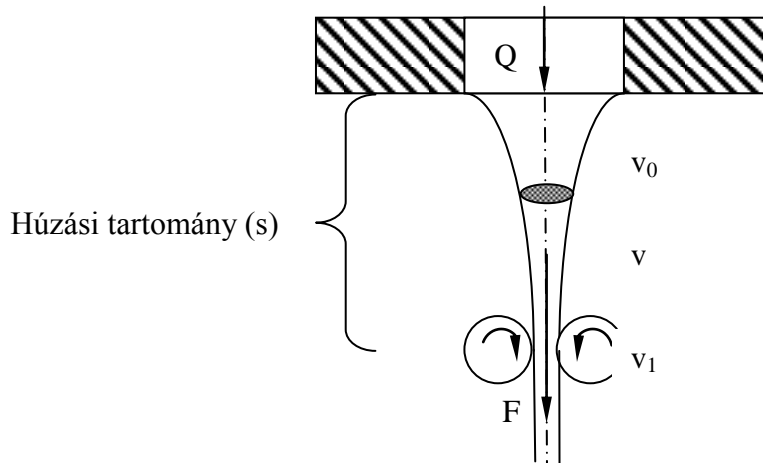
13. ábra. Huzalbevonó-szerszám egyszerűsített vázlata [33]

A fröccsöntő szerszámban létrejövő kifejtőáramlásban is jelentkezik nyújtó hatás [36]. A 14. ábra a szerszámban áramló anyag egy folyadék elemének a deformációját szemlélteti.



14. ábra. Folyadékkelem deformációja kifejtőáramlás során [37]

Az egyik legelterjedtebb módszer a nyújtási viszkozitás meghatározására a lehúzásos technika, melynek során egy extruder szerszámból különböző sebességgel húzzuk ki (nyújtjuk meg) az extrudátumot. Egy ilyen egyszerű nyújtóviszkozitás mérési módszert a 15. ábra szemléltet [38].



15. ábra. Nyújtási folyás vázlata

Feszültség a nyújtott extrudátumban:

$$\sigma_E = \frac{F}{A} = \frac{F \cdot v}{Q}, \quad (73)$$

ahol σ_E nyújtó feszültség;

F nyújtó erő;

A nyújtott keresztmetszet;

v húzási sebesség;

Q térfogatáram.

Maximális feszültség az extrudátumban:

$$(\sigma_\varepsilon)_{\max} = \frac{F \cdot v_1}{Q}. \quad (74)$$

Teljes nyúlás (ε):

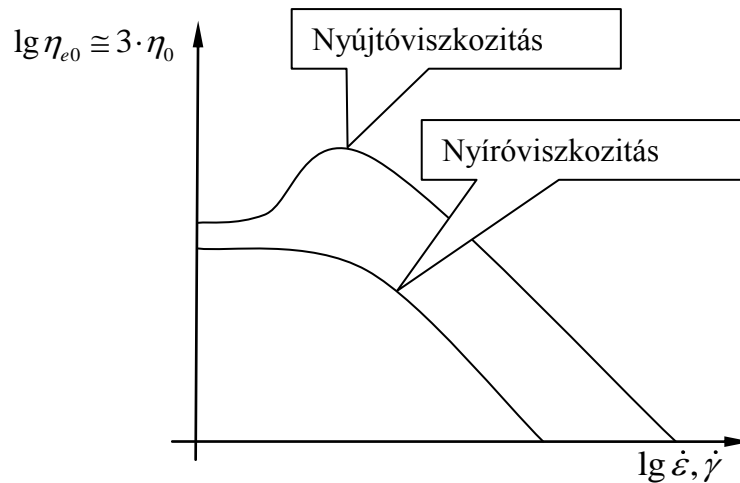
$$\varepsilon = \ln \left(\frac{v_1}{v_0} \right). \quad (75)$$

Nyújtási idő (t):

$$t = \frac{s}{v}. \quad (76)$$

A fenti egyenletek alapján a látszólagos nyújtóviszkozitás:

$$\lambda = \frac{\sigma_\varepsilon \cdot t}{\varepsilon} = \frac{F_s}{Q \cdot \ln \left(\frac{v_1}{v_0} \right)}. \quad (77)$$

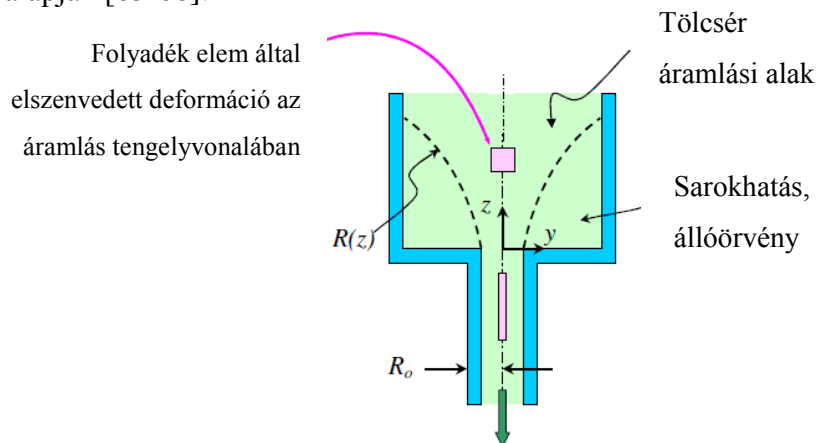


16. ábra. Nyújtó és a nyíró viszkozitás változása a nyíró- és nyújtósebesség függvényében
 A 17. ábrán egy Göttfert reométer látható, amely nyújtóviszkozitás meghatározására alkalmas.
 A húzási sebesség 0...190 cm/sec között változtatható, a mért húzóerő pedig 0...2 N között mérhető.



17. ábra. Nyújtóviszkozitás meghatározására alkalmas berendezés

Nyújtóáram jön létre egy kapilláris belépő szakaszában is (18. ábra), így a nyújtóviszkozitás a kapilláris belépési nyomásvesztése alapján is meghatározható a Cogswell által megadott levezetés alapján [85-88].



18. ábra. Nyújtási viszkozitás meghatározására alkalmas berendezés

Cogswell figyelembe vette mind a nyíró- mind a nyújtóáramot az elemzésében. Feltételezte, hogy a belépési nyomásveszteség egyrészt a nyújtó-, másrészt a nyíróáramból ered. A nyomásveszteséget a nyíró- és normálfeszültségből számította egy elemi kúp erőegyensúlyának felírásával. A teljes belépési nyomásesést az elemi nyomásesés végtelen sorának minimalálásával kapta. A nyújtósebesség a nyílásban:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\tau_w \dot{\gamma}_1}{2(\tau_{11} - \tau_{22})} \quad (78)$$

Ahol τ_w a nyírófeszültség a falnál:

$$\tau_w = \eta \cdot \dot{\gamma}_{app}^n \quad (79)$$

A nyírósebesség a következő összefüggéssel határozható meg:

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3}, \quad (80)$$

ahol Q a térfogatáram;

R a kapilláris sugara.

Az első normálfeszültség különbség a belépési nyomásesésből számítható:

$$\tau_{11} - \tau_{22} = \frac{3}{8}(n+1)\Delta P_{be} \quad (81)$$

A nyújtó viszkozitás meghatározására alkalmas összefüggés kör kapillárisok esetére:

$$\lambda = \frac{\tau_{11} - \tau_{22}}{\dot{\varepsilon}_0} = \frac{\frac{9}{32} \cdot (n+1)^2 \cdot \Delta P_{be}^2}{\tau_w \cdot \dot{\gamma}_{app}} \quad (82)$$

A megfelelő összefüggések sík áramlásra [85-88]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\tau_w \dot{\gamma}_1}{3(\tau_{11} - \tau_{22})}, \quad (83)$$

és

$$\tau_{11} - \tau_{22} = \frac{1}{2}(n+1)\Delta P_{be} \quad (84)$$

Az összefüggések alkalmazásához ismerni kell a nyíró viszkozitási jellemzőket.

A fenti elemzés továbbfejlesztése során Binding [89-90] a konvergáló áramlást vizsgálva, minimalta a viszkózus energia disszipációt.

A nyújtósebesség a középvoalban:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{(3n+1)(1+k^2)}{3k^2(1+n)^2} \eta \dot{\gamma}_l \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \quad (85)$$

A nyújtófeszültség pedig:

$$\tau_{11} - \tau_{22} = \frac{2^{k-1} 3k(1+n) \eta \dot{\gamma}_l}{(3n+1)(1+k)^2} I_{nk} \quad (86)$$

Ahol a k paraméter az alábbi összefüggésből számítható:

$$k = \frac{t}{t+n-1}, \quad (87)$$

t pedig a belépési viszkozitás, – látszólagos nyírósebesség meredekségéből határozható meg:

$$t = \frac{d \log \eta_{be}}{d \log \dot{\gamma}_l} - 1 \quad (88)$$

Az I_{nk} a következő integrálból számítható:

$$I_{nk} = \int_0^1 \left\{ \text{abs} \left[2 - \left(\frac{3n+1}{n} \right) \zeta^{\frac{1+n}{n}} \right] \right\}^{k+1} \zeta d\zeta \quad (89)$$

Amennyiben $0 < n < 1$, akkor a következő egyszerűsített egyenletből számítható:

$$I_{nk} = \frac{n[(1+n)/n]^{k+1}}{2n + (1+n)(k+1)} \quad (90)$$

3.4 Polimer ömledékek nagyrugalmas tulajdonságai

A polimerek áramlása nagyban eltér a kismolekulájú anyagokétól. A makromolekula az áramlás során a nyírófeszültség hatására részlegesen kiegyenesedik és a gombolyodottsági foka is csökken (orientálódik). A folyást követően azonban a makromolekulák felveszik az eredeti gombolyodott, egyensúlyi állapotukat. A folyást tehát reverzibilis nagyrugalmas deformáció követi. A molekula-gombolyag részleges kiegyenesedése és a folyás irányába való orientációjával szembe hat a szegmensek termikus mozgása, aminek következtében a makromolekulák a nyírás előtti gombolyodottsági állapotot igyekeznek felvenni, azaz a molekula-gombolyag a folyási irányra merőleges irányú kiterjedésre és hosszirányú összehúzódásra törekszik. Ennek következtében a polimer ömledékben (a folyás irányára merőleges) normál feszültségek ébrednek.

Az első normál feszültség különbséget a

$$N_1 = \sigma_{11} - \sigma_{22} = \Delta P_{be+ki} + \tau_f \frac{d\Delta P_{be+ki}}{d\tau_f} \quad (91)$$

egyenlet alapján számítjuk [78-80].

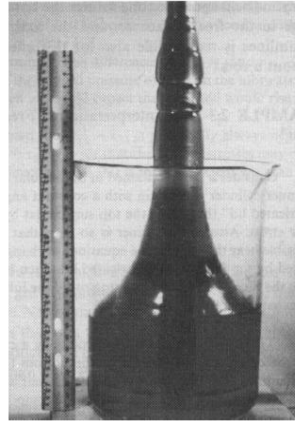
Az egyes nyomásmérő helyeken mért átlagos normál feszültség az alábbi összefüggéssel határozható meg [81]:

$$\sigma_a = P_m - [(1+a)/3]N_1, \quad (92)$$

ahol P_m a mért nyomás érték, $a = 2/7$. Amennyiben a számításokban nyomáskülönbségekkel dolgozunk akkor a (92) egyenlet második tagja kiesik, mivel egy adott nyírósebességnél azonos az érték mindkét nyomásmérési helyen.

3.4.1 Weissenberg-effektus

Weissenberg mutatta ki elsőként, hogy polimerek áramlása során az áramlásra merőlegesen normál feszültség ébred. Az áramlásra merőleges erők bemutatásának szemléletes módja, mikor egy forgó rudat merítünk polimer oldatba vagy polimer ömledékbe és az a rúdra felkúszik.



19. ábra. Weissenberg-effektus szemléltetése [39]

Mivel a normálfeszültségek oka a nagyrugalmas deformáció, a deformáció mértéke és a normálfeszültségek között meghatározott kapcsolat van. Stacioner áramlás során kis deformáció tartományban a Lodge-egyenlet (93), a nagy deformációk esetén pedig a Weissenberg-Mooney-Rivlin egyenlet (94) érvényes:

$$\gamma_e = \frac{\sigma_{\perp}}{2 \cdot \tau}, \quad (93)$$

$$\gamma_e = \frac{\sigma_{\perp}}{\tau}, \quad (94)$$

ahol γ_e az ömledék nagyrugalmas deformációja;
 τ a nyírófeszültség;
 σ_{\perp} a normálfeszültség.

3.4.2 Reológiai duzzadás

A newtoni folyadékok vizsgálata esetén azt tapasztaljuk, hogy a csőből kilépő áramlási keresztmetszet 13%-kal csökken. Ha a polimer ömledék egy tetszőleges csatornából kilép a szabad térbe, akkor az extrudátum méretei a csatorna méreteihez képest növekedni fognak. Ezt a jelenséget reológiai duzzadásnak nevezzük, amelyet elsőnek Barrus figyelt meg.

A reológiai duzzadást a következő tényezők okozzák:

1. A csatornában kialakult parabolikus áramlási profil átrendeződése a kilépés során.
2. Az áramló közegben fellépő nagyrugalmas deformáció relaxációja a kilépéskor.

A newtoni folyadékoknál csak az első jelenség játszik szerepet és ez okozza a kontrakciót. A makromolekuláknál azonban a második túlkompensálja az elsőt. A reológiai duzzadás mértékét a (95) egyenlettel definiált e paraméterrel adják meg:

$$e = \frac{d_c}{d} \cdot \left(\frac{\rho_c}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (95)$$

ahol e a duzzadás mértéke;

d_c a polimer extrudátum átmérője;

d a cső átmérője;

ρ_c, ρ a polimer sűrűsége ömledék állapotban és szobahőmérsékleten.

Az e értéke számos tényezőtől függ. A $\dot{\gamma}$ növekedésével az e értéke nő és határértékhez tart. A duzzadás mértékét a cső geometriai jellemzői is meghatározzák. Az áramlási keresztmetszet L/D viszonyának növekedésével az e érték csökken. A kis L/D viszonyú csatornák esetében mért nagy e érték oka az anyag belépésével hozható kapcsolatba. A folyadékok csatornában való áramlását három szakaszra lehet osztani:

1. belépési szakasz;
2. lamináris és stacioner szakasz;
3. kilépési szakasz.

Mindhárom szakaszt különböző áramlási profilok jellemzik. A belépési szakaszban az áramlás folyamatosan gyorsul és itt éri az anyagot a legnagyobb igénybevétel, ami jelentős nagyrugalmas deformációt eredményez. Ez azonban relaxálódik, ahogyan az anyag a csőben előre áramlik és a lamináris áramlásnak megfelelő egyensúlyi állapot áll be. A kis L/D értékű csatornában nincs idő a relaxációra, így a kezdeti nagyrugalmas alakváltozás is szerepet játszik a duzzadásban. Ezek alapján megállapítható, hogy a lamináris áramlásnak megfelelő e érték (e_{\min}) a polimer ömledékek reológiai jellemzője. A duzzadás következtében nehezebb a nagy méretpontosságú profilok extrudálása.

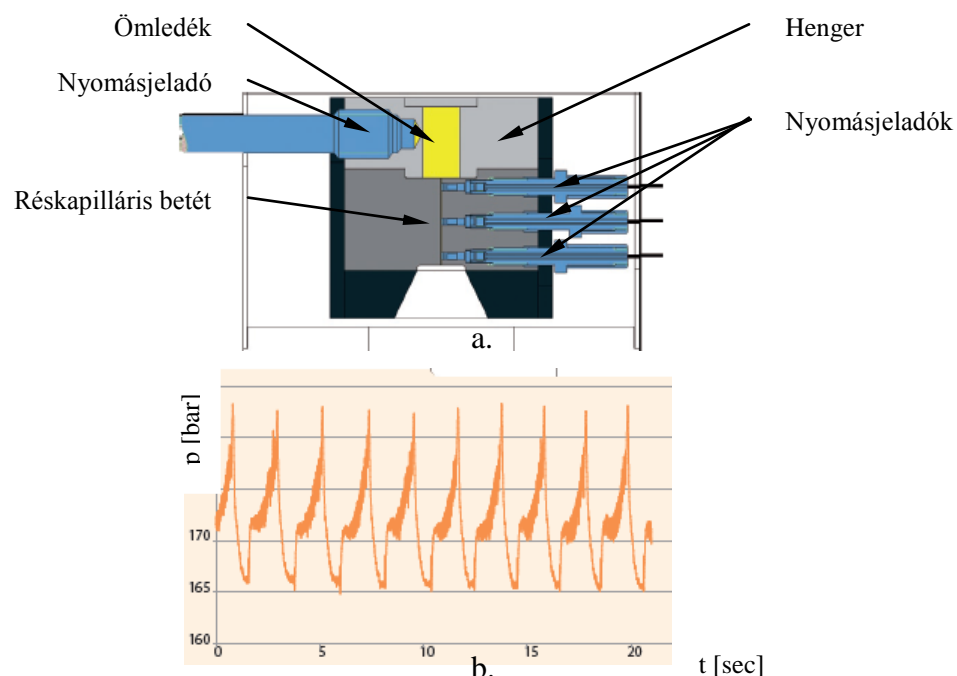
3.4.3 Rugalmas turbulencia (ömledéktörés)

A nagyrugalmas tulajdonságok egyik megjelenési formája a rugalmas turbulencia. A kapillárisból kilépő ömledék szép egyenletes felülete egy bizonyos nyírófeszültség felett „rűcskössé” válik, majd torzul, csavarodik. A felület jellegéből kapta a jelenség a nevét, úgy mint: cápabőr, narancshéj, effektus vagy ömledék törés. A jelenség még a Reynolds-szám szerinti lamináris áramlás tartományában jelentkezik. Legvalószínűbb magyarázata az, hogy a nyírófeszültség növekedésével jelentősen nő a láncok nagyrugalmas deformációja, ami részleges kiegyenesedéshez, orientációhoz vezet. A molekulák közötti orientáció okozta

kölcsönhatás oly mértékben felerősödhet, hogy a polimer elválik a cső falától. A leválás helyén a feszültség relaxálódik, a polimer láncok dezorientálódnak és újból kialakul a kapcsolat a cső falával. Ezek a folyamatok összességében a feszültség pulzálását okozzák, aminek következménye a kilépő ömledék sugár irányú torzulása. A rugalmas turbulencia jellemzésére a megjelenésnél mért kritikus deformáció-sebességet és a kritikus nyírófeszültséget adjuk meg. A kritikus deformáció-sebesség csökken, ha a molekulatömeg növekedik, ha a hőmérséklet csökken, továbbá minden olyan jellemzővel csökken, ami a nagyrugalmas deformációt növeli [82].

Ömledéktörés mérése

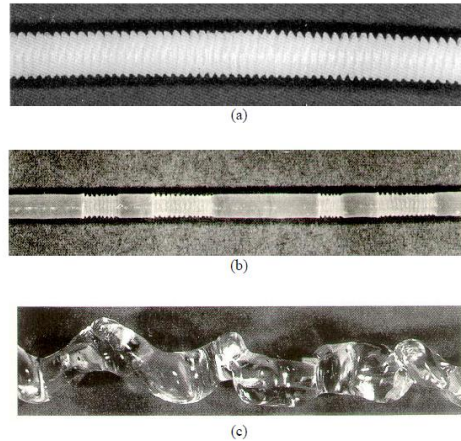
A szerszámból kilépő ömledékek instabil viselkedését már régóta vizsgálják. A jelenséget a kilépő anyag egyenetlen felülete miatt cápabőrösödésnek is hívják [40,41]. A hagyományos reométerek mintavételezési frekvenciája kb. 10 Hz. A jelenség tanulmányozásához azonban ennél sokkal nagyobb, kb. 20 kHz mintavételezési frekvenciára van szükség a nyomás pillanatszerű változása miatt. Az ömledéktörés elsősorban extrudálás esetében okoz problémát, mivel a szerszámból kilépő anyag geometriája torzul, és így a kalibráció nem lehetséges. A Göttfert cég által kifejlesztett mérőeszköz elrendezése és a mért jel a 20. ábrán látható.



20. ábra. Ömledéktörés vizsgálatára alkalmas berendezés (a) és a mért jel (b)

Az extrudátum kilépésekor tapasztalható instabilitások csak nagysebességű, azaz kis válaszüdejű jeladókkal mérhetők. A falcsúszás egy jellemző nyírófeszültség-tartományban

ébred, ami alapanyagonként változhat. Általában az instabil tartomány - a gyakorlati tapasztalatok alapján - kb. 100 MPa és 200 MPa közé tehető. A 21. ábra torzult extrudátumokat mutat be [44].

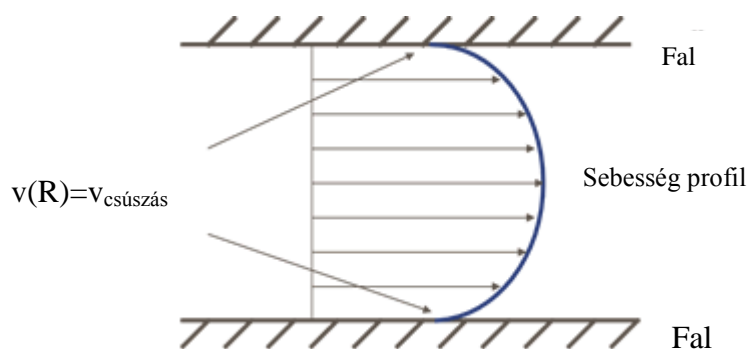


21. ábra. Deformálódott extrudátumok

a: cápbőrösödés, b: bambusz alakzat, c: torzult profil

3.4.4 Falcsúszás meghatározása

Reológiai mérések kiértékelésénél feltételezzük, hogy az ömledék sebessége a falnál zérus, azaz az ömledék nem csúszik meg a szerszám falán. A falcsúszás azonban nagy valószínűséggel bekövetkezik olyan polimer rendszereknél, ahol a molekulaméretnél lényegesen nagyobb egységek, agglomerátumok elmozdulása jön létre (22. ábra), ami elsősorban PVC-re jellemző.



22. ábra. Sebességeloszlás falcsúszás során

A sebesség közvetlen mérése a falnál igen nehézkes lenne, ezért a gyakorlatban közvetett mérési módszert használnak, melyet a módszer kidolgozójáról Mooney-korrekciónak neveztek el, amely a látszólagos deformáció-sebességet korrigálja. A csúszás hatásának vizsgálatára olyan kör keresztmetszetű kapillárisok használhatóak, amelyeknek L/R arány

azonos, de a kapilláris átmérője eltérő [38, 40, 41]. A térfogatáram és a látszólagos nyírósebesség a (96) és a (97) egyenletekkel határozható meg:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3}{4} \dot{\gamma}_{true} + \pi \cdot R^2 \cdot v, \quad (96)$$

ahol $\dot{\gamma}_{true}$ valós deformációsebesség;

R a kapilláris sugara;

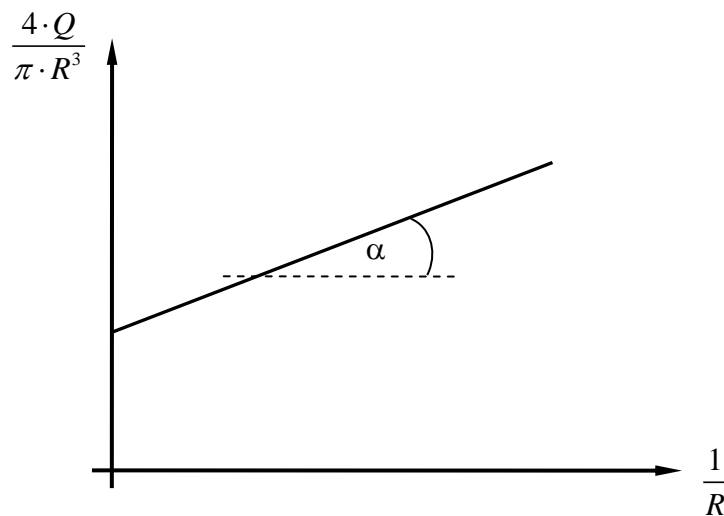
v csúszási sebesség.

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3} = \dot{\gamma}_{true} + \frac{4 \cdot v}{R}, \quad (97)$$

ahol $\dot{\gamma}_{app}$ látszólagos deformáció sebesség;

Q térfogatáram.

A látszólagos nyírósebességet ábrázolva az $1/R$ függvényében egyenest kapunk, melynek a meredeksége adja a falcsúszás mértékét ($\alpha=4v$). Ha $\alpha \leq 0$, akkor nincs csúszás.



23. ábra. Falcsúszás meghatározása több kapilláris segítségével

Az összefüggés azon a feltételezésen alapul, hogy a falcsúszás sebessége az egyetlen tényező, ami befolyásolja a valós nyírósebességet. A gyakorlatban számos problémát okozhat a falcsúszás.

3.5 Végeleemes szimuláció, anyagmodellek

Fröccs-szimulációs programok alkalmazásával fröccsöntött termékek geometriáját, illetve a fröccsöntő szerszámok kialakítását (beömlés, hűtés, formaüreg kiosztások) tudjuk ellenőrizni, optimalizálni. Lehetőségünk van kitöltés, utónyomás, hűtés, vetemedés és egyéb különleges futtatásokra. A szimulációs programok legfontosabb bemenő paraméterei az anyag jellemzői, ezen belül is kiemelkedő szerepe van az anyag folyásgörbéjének [45]. Az egyik legelterjedtebb fröccs-szimulációs program a Moldex3D, amely a következő anyagmodelleket használja [46]:

- Viszkozitást leíró összefüggések (7 típus):
 - newtoni modell,
 - hatványtörvényt követő anyagmodell,
 - cross modell (1),
 - cross modell (2),
 - cross modell (3),
 - carreau,
 - carreau-Yasuda.
- P-v-T összefüggések (5 típus).
- Fajhő hőmérsékletfüggését leíró összefüggések (4 típus).
- Hővezetési tényező.
- Viszkoelasztikus jellemzőket leíró összefüggések (5 típus).
- Mechanikai jellemzők.

A szimulációs programok számításainak helyességét nehéz ellenőrizni, mert a vizsgált fröccsöntött darabok geometriája igen bonyolult. Azért érdemes kísérleti szerszámokat építeni, melyek alkalmasak lehetnek a végeleemes programok eredményeinek ellenőrzésére [51-53].

3.6 Méréstechnika

3.6.1 Szabványos mérőberendezések

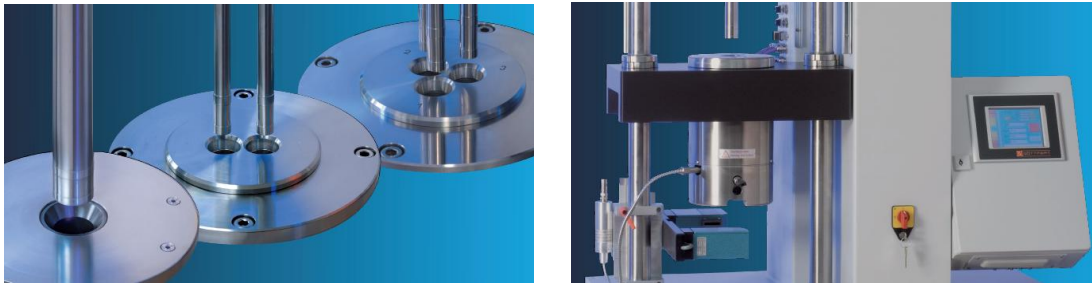
Viszkózus anyagok reológiai jellemzőinek meghatározására többféle berendezést készítenek. Ezek felépítésüktől függően tudják meghatározni az elasztikus, viszkoelasztikus és a viszkózus jellemzőit a vizsgálati alanyoknak.

Működési elvük szerint lehetnek:

- MFI mérőberendezések;
- Kapilláris reométerek
 - nyújtási feltét,
 - duzzadásmérés,
 - P-v-T feltét,
 - nyomás alatti viszkozitás meghatározása,
 - rugalmas turbulencia vizsgálati feltét,
- Rotációs reométerek;
- Oszcillációs reométerek;
- On-line reométerek.

A legegyszerűbb és elterjedtebb berendezések a kapilláris reométerek. Működésük szempontjából a méréseket állandó nyírósebesség (MFI mérőberendezés), vagy állandó deformáció-sebesség mellett tudják elvégezni. Kapilláris reométerek mérőegységének kiegészítésével számos reológiai paraméter meghatározható. Rotációs viszkoziméterek lehetnek henger-henger, lap-lap, kúp-lap elrendezésűek. Oszcillációs reométerrel az ömledékek dinamikus jellemzőit tudjuk meghatározni hasonló módon, mint a DMTA berendezésekkel szilárd polimer rendszereken. Az on-line reométerek egy feldolgozó gépre (extruder alapgépre) vannak csatlakoztatva és képesek feldolgozás közben, folyamatosan méréseket végezni.

A 24. ábra több kapillárisú reométereket mutat be, melyek egy mérésből képesek a Bagley-, Rabinowitsch- és Mooney-korrekciókat elvégezni.



24. ábra. Többkapillárisú reométerek

3.6.2 Reológiai mérésre alkalmas rendszerek fejlesztése napjainkban

Műszerezett spirál szerszám

A Zaragozai Egyetem (Spanyolország) munkástársai egy Kistler nyomásjeladókkal felszerelt spirálcSATORNÁS fröccsöntő szerszámot alkalmaztak folyásgörbe felvételére [1]. Megállapították, hogy a hagyományos reométerekkel, laboratóriumi körülmények között meghatározott folyásgörbék nem minden esetben megfelelőek fröccs-szimulációs programok bemenő anyagmodelljeinek pontos leírásához. Méréseikhez eredeti és újrahasznosított polipropilént alapanyagot használtak, $900 \text{ s}^{-1} \dots 3750 \text{ s}^{-1}$ deformációsebesség-tartományban dolgoztak. A folyásgörbe meghatározásához korrekciókat nem alkalmaztak, a mérési pontokra empirikus másodfokú logaritmikus egyenletet illesztettek (98):

$$\ln(\eta) = A_0 + A_1 \ln(\dot{\gamma}) + A_2 \ln(\dot{\gamma}) + A_2 \cdot T + A_3 \ln(\dot{\gamma})^2 + A_4 \cdot T \cdot \ln(\dot{\gamma}) + A_5 \cdot T^2, \quad (98)$$

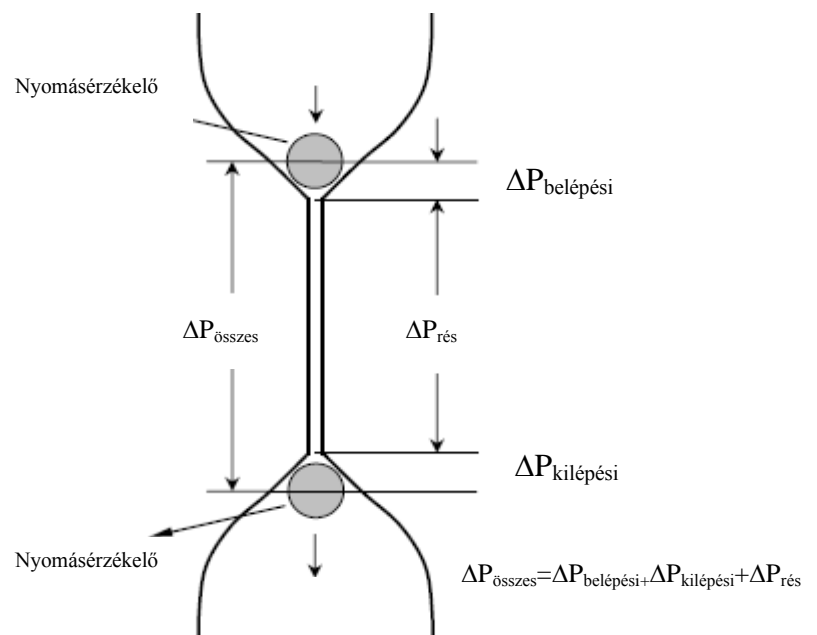
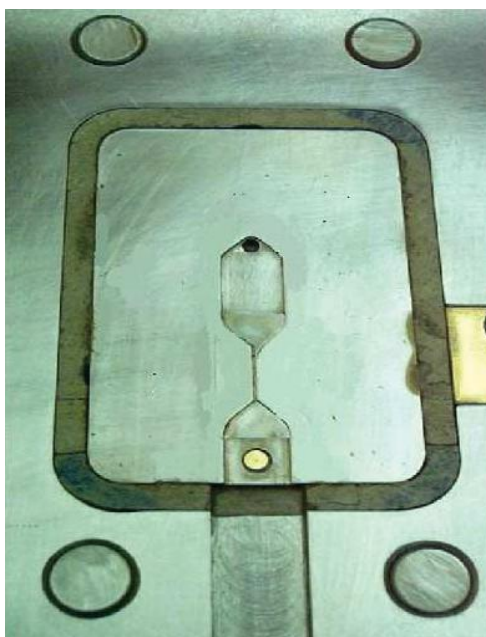
ahol η az anyag viszkozitása;
 A_i anyagi minőségtől függő állandó;
 $\dot{\gamma}$ deformáció-sebesség.

A spirál szerszámmal meghatározott folyásgörbék 10%-ban tértek el a kapilláris reométerrel meghatározottaktól. Ez azért is meglepő, mert a Bagley- és a Rabinowitsch-korrekciót nem végezték el. Tapasztalataink alapján ebben a nyírósebesség tartományban a Rabinowitsch-korrekció után a nyírósebesség megközelítőleg 10%-kal nagyobb értékű. A Bagley korrekció nélkül a látszólagos viszkozitás akár egy nagyságrenddel nagyobb is lehet. A szerzők kiadványukban nem térnek ki részletesen a szerszámhőmérséklet, az áramlási keresztmetszet és a szerszám felületi minőségének hatására.

Érdeemes megemlíteni, hogy kevésbé kutatott terület a marási technológia hatása a fröccsöntő szerszám üregében létrejövő áramlási viszonyokra és a késztermék minőségére [45].

Mikrocsatornás fröccsöntő szerszám

Chun-Sheng Chen és munkatársai egy mikrocsatornás fröccsöntő szerszámot fejlesztettek [3,4]. A szerszám kialakítását a 25. ábra szemlélteti. Az alkalmazott rések négyzet keresztmetszetűek és 0,2 mm, 0,3 mm és 0,5 mm oldalhosszúságban készültek el. Mérési eredményeik alapján azt találták, hogy ilyen kis réskeresztmetszetenél 5...35%-kal kisebb látszólagos viszkozitást mértek a hagyományos eszközökhöz képest. Többek között ezt a rés felületének mikrogeometriájával, a falcsúszással, a hőáram mikroméreték között lejátszódó hatásával és a viszkoelasztikus jellemzőkkel magyarázzák.



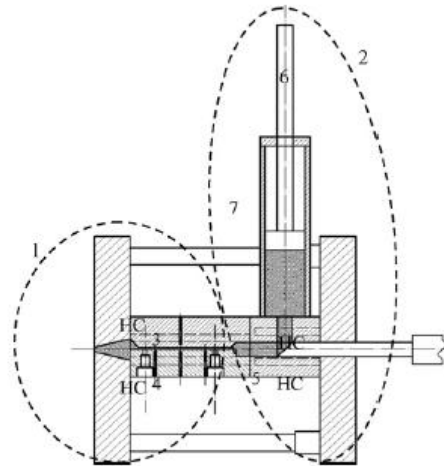
25. ábra. Mikrocsatornás reológiai szerszám felépítése

Ceast inline

A Padovai Egyetem munkatársai (Bariani, Salvador és Lucchetta) a megömlesztési folyamatot vizsgálták, ehhez egy reológiai fröccsöntő szerszámot fejlesztettek ki [48]. Megállapították, hogy a hagyományos kapilláris reométerekkel vizsgált anyagok megömlesztési folyamata eltér a fröccsöntő gépek plasztikálásától, így a vizsgált reológiai jellemzők is. A valós plasztikálás hatásának vizsgálatához változtatták a plasztikálási sebességet (csiga fordulatszámot), anyaghőmérsékletet és a tartózkodási időt. Polikarbonátot használtak, ami nem véletlen, mert a gyakorlati tapasztalatok is azt mutatják, hogy ez az anyag érzékeny a megömlesztés folyamatára. A szabványos reológiai méréseket kétkapillárisú CEAST reométerrel végezték el $150 \text{ s}^{-1} \dots 5000 \text{ s}^{-1}$ nyírősebességek között. A látszólagos

viszkozitás az összes kísérleti beállításnál kisebb volt, ha az anyagot a fröccsöntőgép plasztikáló egységével ömlesztették meg. Egyes esetekben akár 20%-os különbségeket is tapasztaltak. A fröccsöntő gép csiga átmérője 40 mm volt, és számításaik szerint a beállítható maximális térfogatáram (fröccssebesség) $125 \text{ cm}^3/\text{sec}$. A pontatlanság csökkentése érdekében egy külön hengerrel szabályozták a mérőszerszámban a vizsgált anyag áramlási sebességét, térfogatáramát.

A mérőszerszám egyszerűsített rajzát a 28. ábra szemlélteti.



26. ábra. A Padovai Egyetemen és a CEAST által fejlesztett reológiai szerszám vázlata

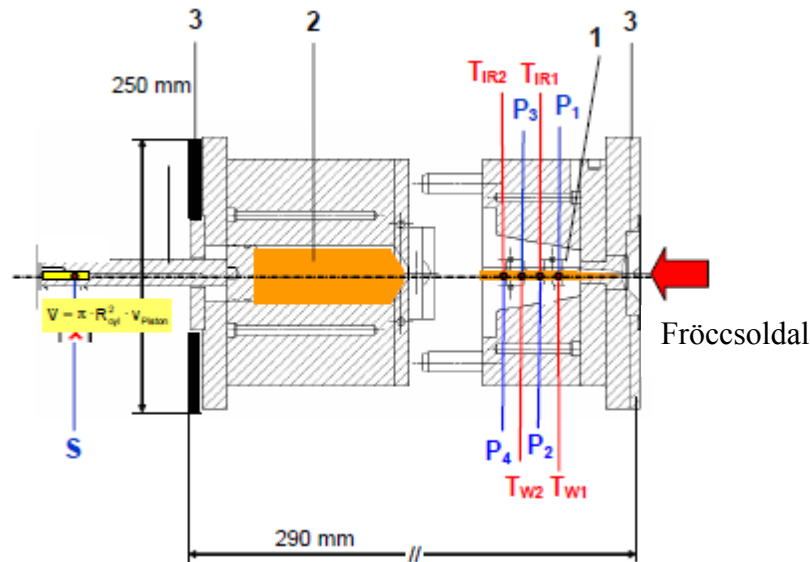
- 1) réskapilláris rendszer; (2) térfogatáramszabályzó-rendszer; (3,4) kapilláris betétek; (5) csatorna; (6) dugattyú; (7) henger; (HC) fűtőbetétek

Polipropilént (Sabie PP48M10) alapanyagot is használtak, aminek reológiai tulajdonságai alig függenek a megömlesztés jellegétől. Az összehasonlító vizsgálatuk alapján megállapították, hogy a szerszámmal sikerült reprodukálni a szabványos méréssel kapott folyásgörbét. A kiadvány csak a mérések során tapasztaltakkal és a berendezés fejlesztésével foglalkozik, azonban nem esik szó a számítások menetéről, és a szerszámban lejátszódó folyamatokról.

Reológiai fröccsöntő szerszám

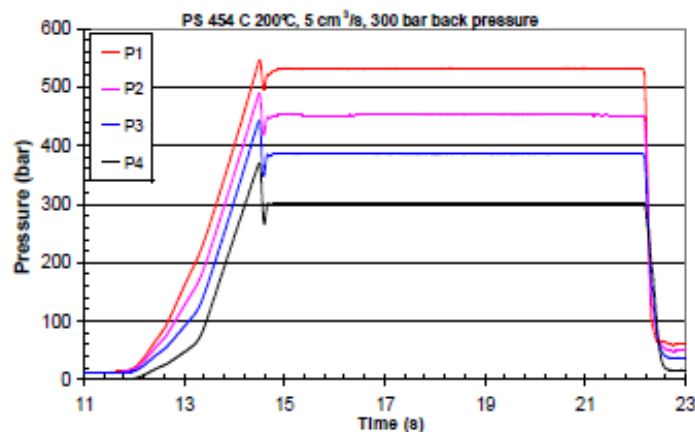
Holzer és munkatársai kifejlesztettek egy fröccsöntő szerszámot, amely alkalmas egy speciális szerszámüreg kitöltési folyamatának vizsgálatára (27. ábra). A 28. ábra a nyomás időbeli lefutását mutatja [51]. Polisztirol folyási jellemzőit vizsgálták 200°C , 220°C és 240°C -on, széles deformáció-sebesség és nyomás-tartományban. A felhasznált reológiai jellemzőkből anyagmodelleket készítettek szimulációs program számára. Az anyagmodellek segítségével egy vékonyfalú termék kitöltését szimulálták. Az általuk meghatározott

anyagjellemzőkkel pontosabban sikerült a termék szerszámkitöltését szimulálniuk. Az így kapott eredmények sem írták le pontosan a valós fröccsöntést, ami nem meglepő, mert a végeleemes háló és az anyagtulajdonságok mellett a technológiai beállítások is nagy hatást gyakorolnak a szimuláció eredményeire. (28. ábra).



27. ábra. A Leobeni Egyetemen kifejlesztett reológiai mérőszerszám

(1) kapilláris betétek; (2) térfogatárammérő-egység; (3) hőszigetelő lap; (P_x) nyomásérzékelők; (T_{irx} , T_{wx}) hő- és hőáram-érzékelők; (S): elmozdulás érzékelő



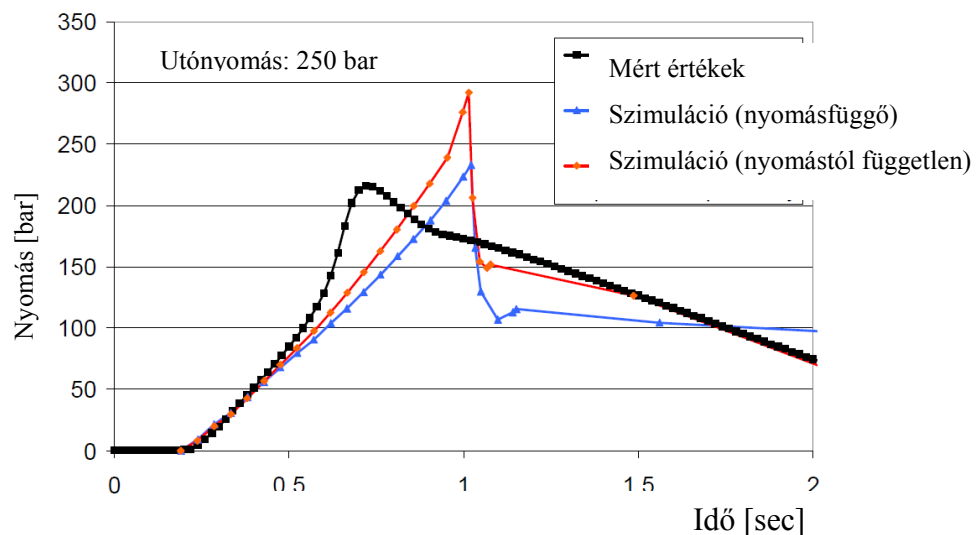
28. ábra. Belső nyomás az üreg kitöltése alatt

A vizsgálatokat megismételték 200, 300, 400 bar túlnyomáson. A berendezés 3000 s^{-1} ... 33.000 s^{-1} deformációsebesség-tartományban alkalmazható. Azt találták, hogy nyomás alatt meghatározott látszólagos viszkozitásgörbék szignifikánsan eltértek egymástól (2. táblázat).

2. táblázat. Nyomás alatt meghatározott látszólagos viszkozitás értékek

$\dot{\gamma}$ [s^{-1}]	$\Delta\eta$ [%] ($\Delta p=200$ bar)	$\Delta\eta$ [%] ($\Delta p=400$ bar)
3000	12	28
6000	11	26
9000	10	24
15000	9	22
24000	9	21
33000	8	19

A folyásgörbék felhasználásával fröccsszimulációt végeztek Autodesk Moldflow Insight 2010-R2 programmal. A túlnyomáson meghatározott folyásgörbékkel készített anyagmodellek pontosabban írták le egy vékonyfalú termék fröccsöntő szerszámának kitöltésének folyamatát. A 29. ábrán a szerszámában mért és a szimulált nyomásgörbék láthatók. A fekete görbe a mért a piros és kék görbék a szimulált nyomást lefutást szemléltetik. A nyomás csúcsokat tekintve megállapítható, hogy a nyomás alatt meghatározott anyagmodellekkel nagyobb pontosságot lehetett elérni a szimulációk során.



29. ábra. Belső nyomás az üreg kitöltése alatt

3.7 Irodalmi áttekintés kritikai értékelése

A szakirodalom áttanulmányozása során megállapítottam, hogy a szabványos vizsgálati technikák mellett, különféle eszközöket és módszereket fejlesztenek ki, hogy a legváltozatosabb körülmények között határozzák meg a műanyagok reológiai paramétereit. Használják átalakított szakító berendezést [49], extrúziós berendezéseket speciális szerszámozással (on-line extruziométerek) [50]. azonban fröccsöntő gépet eddig alig néhány kutató használt reológiai vizsgálatokra. A feldolgozott irodalmi adatok alapján megállapítható, hogy fröccsöntő géppel és speciális szerszám alkalmazásával lehetségesek a reológiai mérések, azonban a szerszám kitöltési folyamata még kevésbé tanulmányozott terület.

A fentiek alapján a dolgozatom célja:

- 1) a reológia mérésre alkalmas műszerezett fröccsöntő szerszám tervezése;
- 2) a reológiai jellemzők meghatározása réskapillárisokkal, nyíróáramban végrehajtott mérések alapján;
- 3) a viszkozitás hőmérséklet- és nyomásfüggésének meghatározása a mérőszerszámokban, valós feldolgozási körülmények között;
- 4) a reológiai jellemzők meghatározása nyújtási áramban.

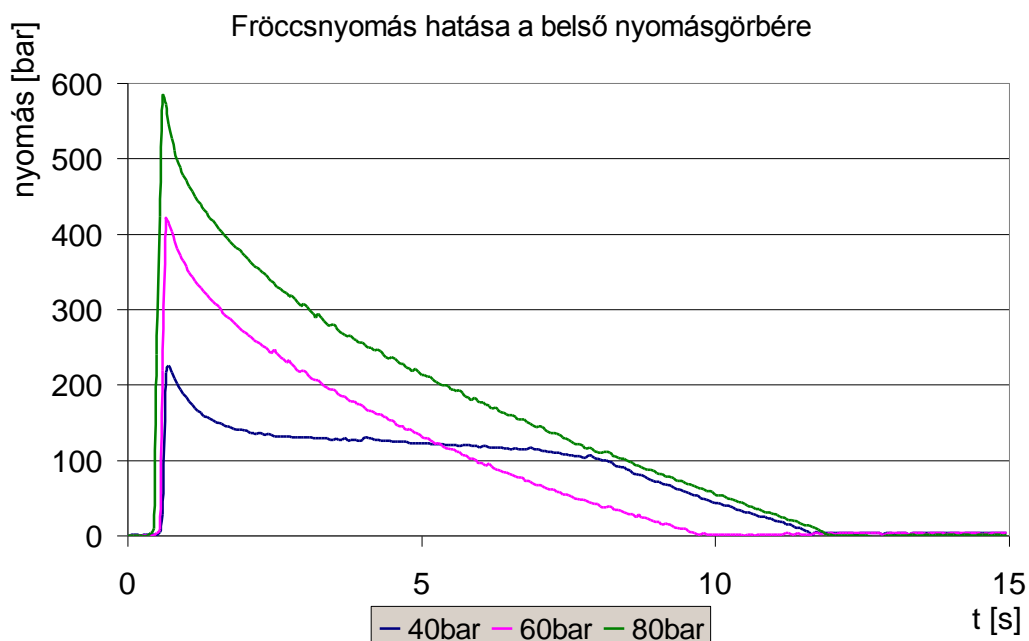
4 Kísérleti rész

4.1 Előkísérletek

A kutatómunka elindításakor egy hagyományos fröccsöntő szerszámba építettünk be nyomásérzékelő szenzorokat. Tapasztalatot szereztünk a szerszám alkatrészek gyártásában, az elektronikai és a jelfeldolgozó rendszer felépítésében, valamint az adatgyűjtő szoftverek műanyagipari alkalmazásában. A következő fejezetekben a mérőszerszám kifejlesztésének egyes lépéseit mutatjuk be.

4.1.1 Fröccsöntő szerszám üregnyomásának mérése

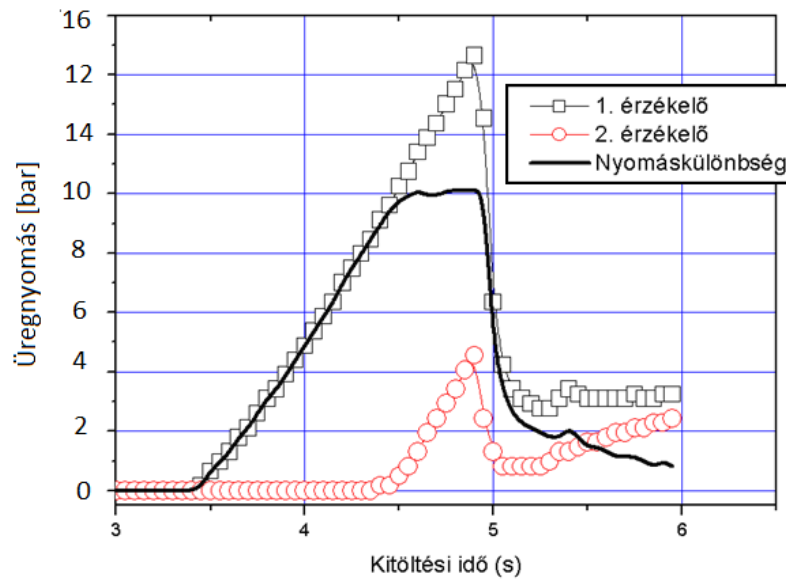
Ipari gyakorlatban elterjedt módszer a szerszám belső nyomásának regisztrálása [57]. Kísérleteink kezdeti szakaszában egy ejtődárdás próbatest gyártó fröccsöntő szerszámba építettünk be nyomásérzékelő szenzorokat [54-59]. A vizsgálathoz Engel ES 120 típusú fröccsöntő gépet használtunk. Célunk az volt, hogy a gyártási ciklus alatt mérhető nyomásgörbe segítségével a beállított technológiát optimalizáljuk. A fröccsnyomás hatását a belső nyomásgörbére az 28. ábrán szemléltetjük.



30. ábra. Fészeknyomás a fröccsnyomás függvényében

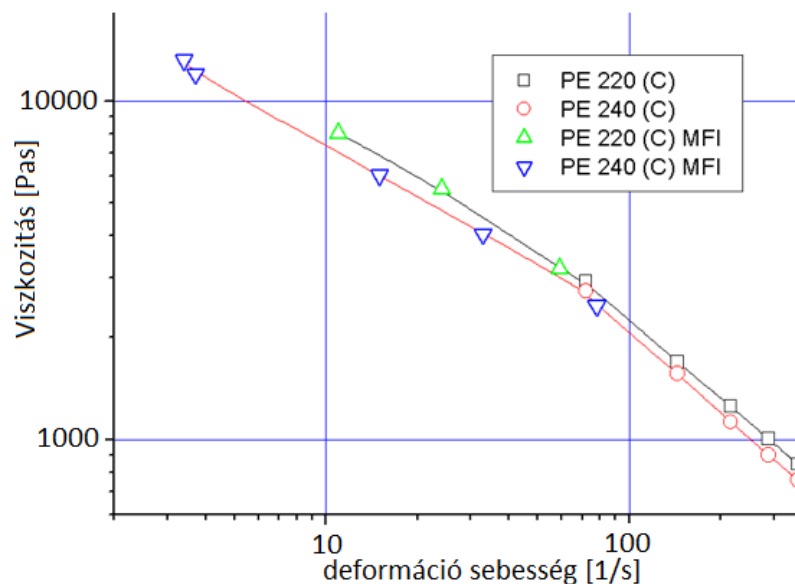
A rendszert egy jeladóval bővítettük és ezzel lehetővé vált, hogy nyomáskülönbséget mérjünk. A jeladók érzékenysége elegendőnek bizonyult ahhoz, hogy meg tudjuk mérni a

kitöltés fázisában fellépő nyomást (31. ábra). A formaüreg geometriáját és a jeladók pozícióját ismertük, a fröccssebesség a gépen beállítható, így a nyomáskülönbség mérhető.



31. ábra. Nyomásmérés két jeladóval

Ez fontos előrelépés volt számunkra, mert a mérési eredményekből egyszerűbb reológiai számításokat el tudtunk végezni. MFI berendezéssel és a mérőszerszámmal meghatározott viszkozitásgörbék a 32. ábrán láthatóak.

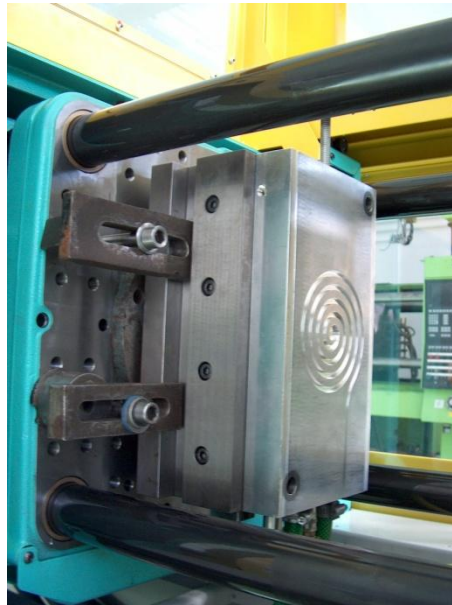


32. ábra. Viszkozitásgörbék összehasonlítása

A számítások során korrekciót nem alkalmaztunk, így a görbék egybeesése nagy valószínűséggel a véletlen eredménye. Mindenesetre a tapasztalataink alapján a rendszert tovább fejlesztettük.

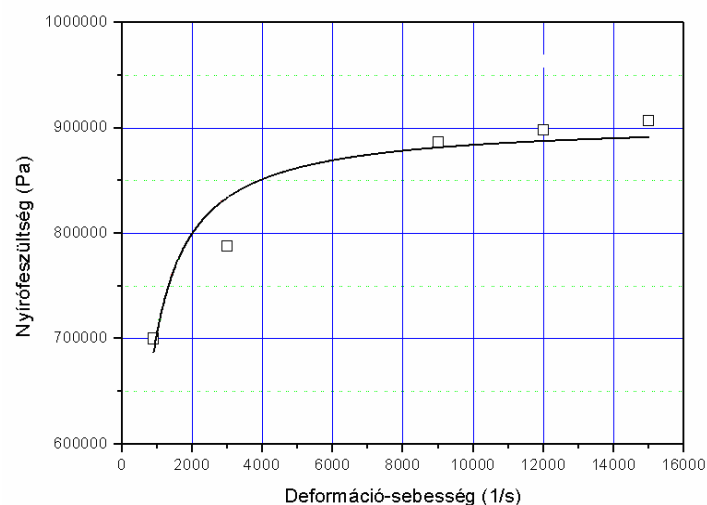
4.1.2 Spirálcsatornás szerszám

Az előzőekben ismertetett mérőszerszám tapasztalatai, és az irodalmi adatok segítségével megterveztünk és elkészítettünk egy spirálcsatornás fröccsöntő szerszámot [60-62]. A szerszám mozgóoldali formalapja a 33. ábra mutatja be.



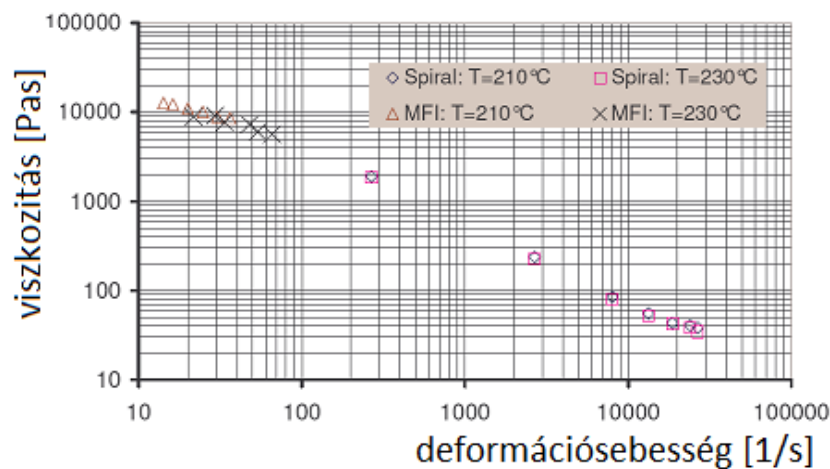
33. ábra. Spirálcsatornás szerszám mozgóoldali formalapja

A kísérletek kezdeti fázisában nem építettünk be nyomásjeladókat, egyszerűen a fröccsöntő gép által regisztrált fröccsnyomásból határoztuk meg a folyásgörbéket. Változtattuk a befrocsöntött anyag mennyiségét, és így változott a folyási út is. Ezzel az egyszerű módszerrel lehetővé vált, hogy a folyási úthossz mérésére már régóta használt berendezéssel folyásgörbét is meg tudtunk határozni, igaz a korrekciókat ezzel a kialakítással nem tudtuk végrehajtani.



34. ábra. Spirál fröccsöntő szerszámmal meghatározott folyásgörbe

A 34. ábrán jól látszik, hogy viszonylag széles 1000 s^{-1} ... 16000 s^{-1} nyírósebesség-tartományban tudunk mérni. Ez a viszonylag kis, $5 \times 2 \text{ mm}$ -es kapilláris keresztmetszettel magyarázható. Réskapillárisok esetén érdemes az áramlási keresztmetszet szélesség-vastagság arányát 10:1-re növelni. Ebben az esetben ez az érték 2,5 volt, azaz a falhatással biztosan számolni kell. További hátránya a spirál kialakításnak, hogy hosszú folyási útát eredményezett, így nagy viszkozitású anyagok esetén a gép elérte a maximális fröccsnyomást. A fejlesztés következő lépésében a szerszámba két 100 bar méréstartományú Kistler nyomásérzékelőt építettünk be, és az előzőekben már ismertetett nyomásmérő rendszer elektronikájával regisztráltuk a nyomást. Az összehasonlító méréseink eredményei a 35. ábrán láthatók. Korrekciókat egyik módszernél sem alkalmaztunk. Az MFI mérőrendszer állandó nyírófeszültség mellett, míg a mérőszerszám állandó nyírósebesség mellett működik. A folyásindexmérőnél terhelő súlyokat változtatjuk, ami létrehoz egy áramlási sebességet, míg a mérőszerszámnál a fröccssebességet és ezzel közvetlenül a térfogatáramot tudjuk meghatározni.

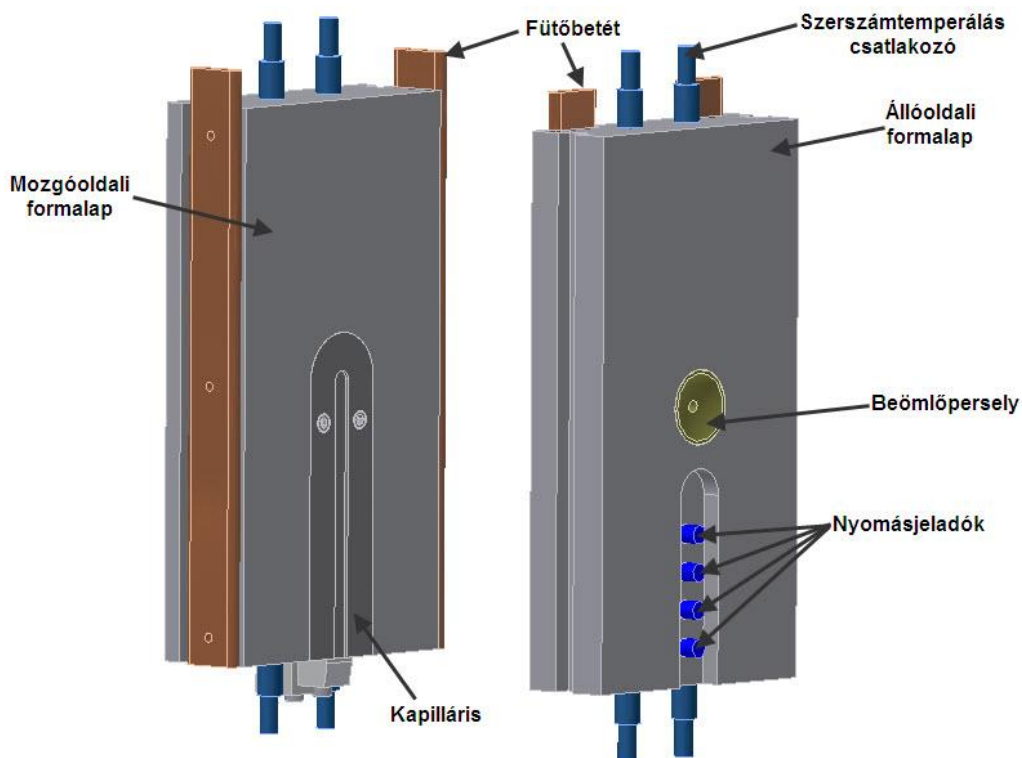


35. ábra. Viszkozitásgörbe spirál szerszámmal és MFI mérővel meghatározva

4.1.3 Réskapilláris szerszám

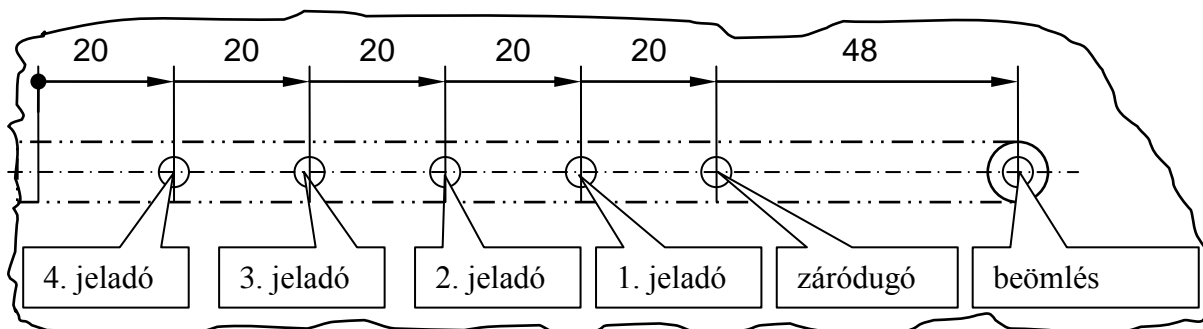
Szerszám felépítése

Mivel az előzőleg ismertetett rendszerekkel nem tudtuk változtatni az áramlási rés szélességének és vastagságának az arányát, ezért egy teljesen új konstrukciójú szerszámot terveztünk [63-68]. Célunk az volt, hogy a kapillárisok könnyű cseréjével, többféle mérést tudjunk elvégezni és a szerszámhőmérsékletet is széles tartományban tudjuk változtatni. A szerszámra elektromos fűtést terveztünk, amivel közel 300°C-os szerszámhőmérsékletet tudunk elérni. A szerszám főbb részei a 36. ábrán láthatók.



36. ábra. A mérőszerszám formalapjainak kialakítása

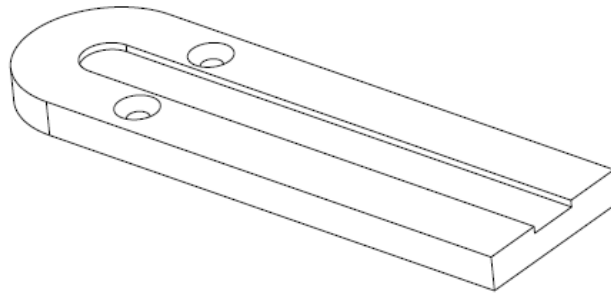
A szerszám állóoldali formalapjának elrendezése a 37. ábrán látható.



37. ábra. Nyomásjeladók helyzete az álló oldali formalapban

Az állóoldali formalap formaadó felülete síklap. Az 1-, 2-, 3-as jeladók nyomásmérésre, a 4. jeladó hőmérsékletmérésre is alkalmas. Az első furatot lezártuk, ezt a későbbi bővítési lehetőség miatt építettük ki.

A szerszám mozgóoldali formalapjába egy süllyesztést martunk, ahova laza illesztésű cserebetéteket helyezhetünk be. A próbákhoz több mint 20 db cserélhető kapilláris betétet készítettünk el különböző geometriával, a 38. ábrán egy betét kialakítása látható.



38. ábra. Szerszám betét axonometrikus képe

Az előkísérletek során azt tapasztaltuk, hogy az 1 mm-es kapillárisokban túl nagy nyomás ébredt. A túl nagy keresztmetszetű kapillárisal pedig csak kis deformáció-sebességet értünk el.

Tapasztalataink szerint a mérések kivitelezéséhez a legmegbízhatóbb kapillárisok (3. táblázat) a következők:

3. táblázat. Kapillárisok méretei

Kapilláris száma	1.	2.	3.	20.	21.	22.	23.
Mélység (h) [mm]	2	3	4	2	2	2	2
Áramlási hossz az első jeladótól számítva (l) [mm]	80	80	80	45	65	80	2
Rés szélesség (w) [mm]	15	15	15	15	15	15	15

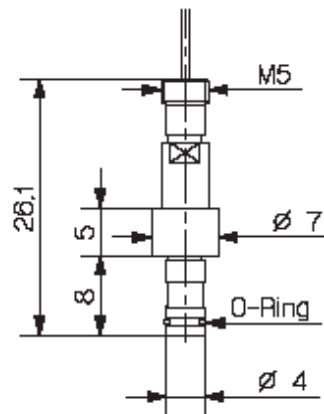
A 23. jelű kapilláris nyújtási folyás meghatározására alkalmas. A második és a harmadik jeladó között 2 mm-es egyenes fojtást alakítottunk ki (39. ábra).



39. ábra. Nyújtási viszkozitás meghatározásához alkalmazott betét

Mérő elektronika részei

A szerszámba három Kistler 6157BD típusú (40. ábra) nyomásjeladó és egy darab 6190A jelzésű hőmérséklet és nyomásmérésre is alkalmas jeladót építettünk be. A szenzorok 2000 bar nyomásig használhatók és a maximális szerszám hőmérséklet a 300°C-ot is elérheti. Fontos volt, hogy fröccsöntő szerszámokhoz fejlesztett jeladókat használjunk, mert ugyan az extruder gépek nyomásérzékelői magasabb hőmérsékleten is képesek üzemelni, de működésük lényegesen lassabb, méretük nagyobb. A szerszámban a kitöltési idő jellemzően másodperces nagyságrendbe esik, ezért a nyomás méréséhez olyan érzékelőt kellett választani, melynek jelfelfutása elég gyors a nagysebességű mérésekhez. A fröccsöntő szerszámokban használt nyomásérzékelők piezoelektromos elven működnek, a gyártó adatlapja szerint a sebességük meghaladja 20.000 Hz-et.



40. ábra. Nyomásérzékelő szenzor fejének méretei

A töltéserősítő feladata a piezoelektromos szenzorok villamos töltésének felerősítése 0...10 V-os tartományba, valamint a feszültség továbbítása az analóg-digitális átalakítónak. Az egysatomás Kistler 5039A222 típusú erősítőket a 41. ábra szemlélteti, az adatait a 4. táblázat tartalmazza.



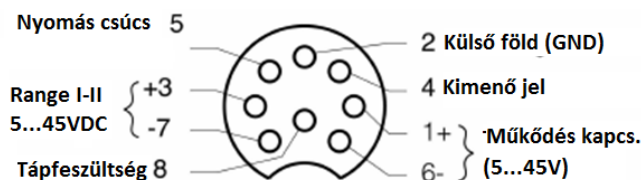
41. ábra. A töltéserősítők (4 csatorna)

Az erősítő két méréshatárral rendelkezik, az első (Range I) méréshatárnál 20000 pC-ot, a második kisebb méréshatárnál (Range II) 5000 pC-ot erősít fel 10 V-ra. Két kimenete van: a csúcserték kimenet (5) és a pillanatnyi érték kimenet (4), ez utóbbit használjuk. A

töltéserősítőknek stabilizált tápegység biztosít 30 V egyenfeszültséget, melynek (+) pólusa kapcsolón keresztül a csatlakozó rajza alapján (42. ábra) a 8 pontra csatlakozik.

4. táblázat. A Kistler 5039A222 típusú erősítő főbb technikai adatai

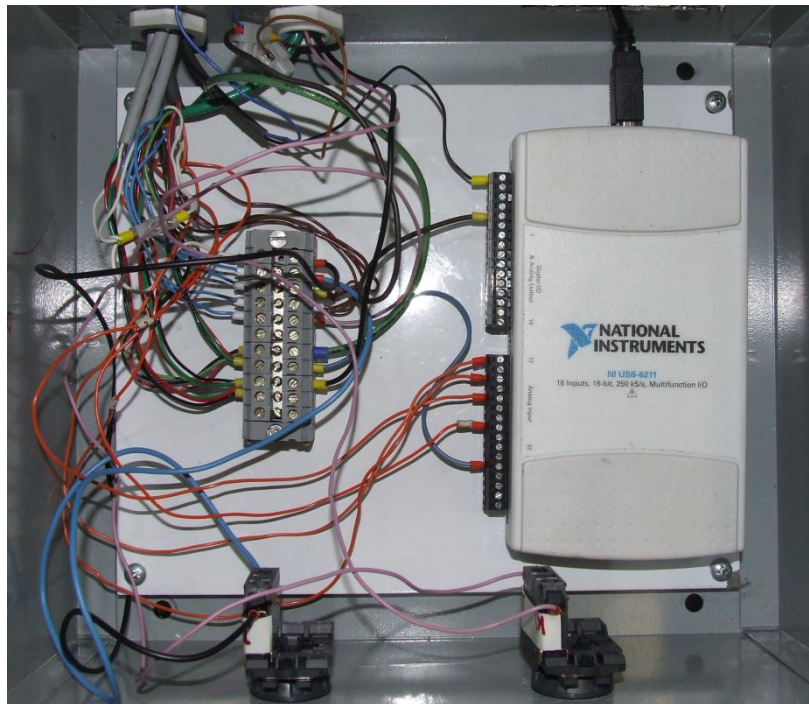
Jellemző	mértékegység	Érték
Tápfeszültség	V	18...36
Áramfelvétel	mA	<30
Kimeneti feszültség	V	±10
Kimeneti áramerősség	mA	Max. ±5
Kimeneti impedancia	Ω	10
Hőmérsékleti tartomány	°C	0...+60
min./max. hőmérséklet	°C	-40/+80
Méréshatár I (Range I)	pC	20000
Méréshatár II (Range II)	pC	5000



42. ábra. A töltéserősítők csatlakozásának bekötése

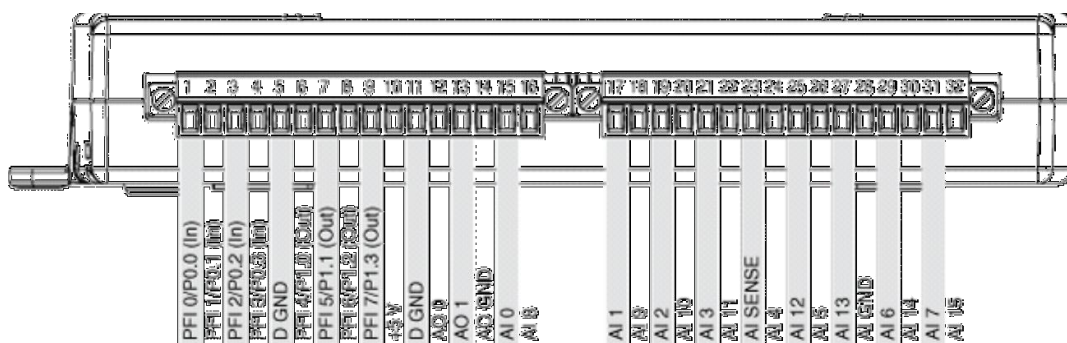
A +3 és a -7 pontokra is a tápegység csatlakozik a polaritástól függően, aminek bekötése a kisebbik (Range II) mérés határ használatát teszi lehetővé. A mérés határ vezérlése az 1+ és a -6 pontokra való feszültség rákapcsolásával lehetséges, ehhez is tartozik egy kapcsoló. A kimeneti feszültséget a 4 ponton mérjük, ehhez tartozó földelés a 2 ponton van, közösen a tápegység (-) pólusával.

Méréseinkhez NI USB-6211 A/D átalakítót használtunk, egy multifunkcionális külső adatgyűjtő kártya (43. ábra) látja el a mérőrendszerben az A/D átalakító szerepét. Az eszköz 16 darab analóg bemenettel rendelkezik, melyek 16 bit-es felbontásúak és 250 kS/s mintavételi frekvenciájúak. 2 analóg kimenete van, melyek szintén 16 bitesek, és 250 kS/s frekvenciájúak, valamint 4 digitális bemenetet, 4 digitális kimenetet és 32 bites számlálót is tartalmaz. A számítógéppel USB porton keresztül csatlakozik, ami az eszköz tápellátását is biztosítja. Maximális feszültségtartománya -10...10 V, 2,69 mV pontosságú, 91,6 μV érzékenységgű.



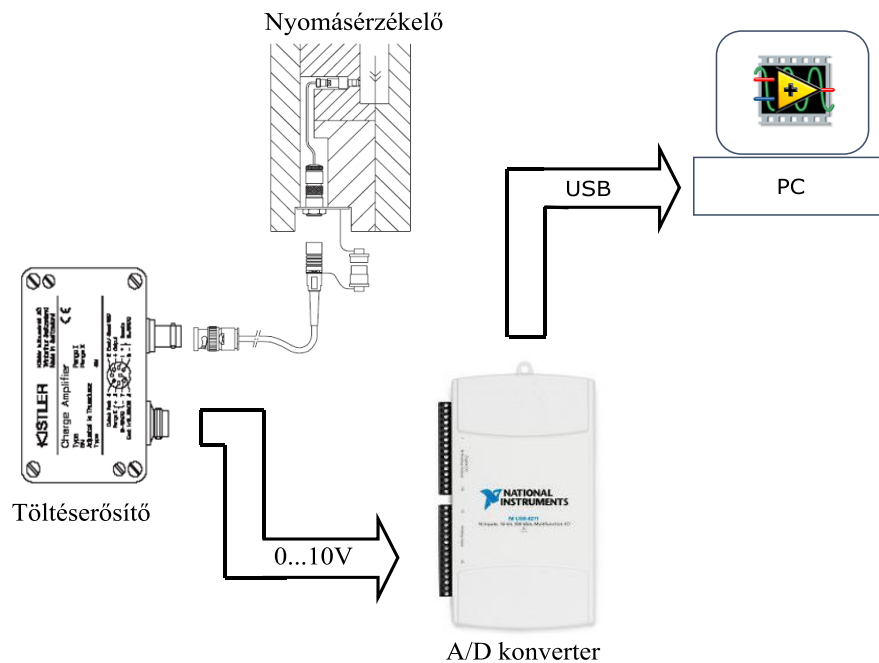
43. ábra. A beillesztett NI USB-6211 multifunkciós adatgyűjtő

A töltéserősítők Output kimenetei a 17 (AI 1), 19 (AI 2), 21 (AI 3), 24 (AI 4) analóg bemenetekre csatlakoznak elhelyezkedésüktől függően (44. ábra). Az ömledék folyásával megegyező irányban az első érzékelő jele az AI1, az utolsó pedig az AI4-hez tartozik. Az analóg bemenetek 28-as földelése (AI GND), sorkapcson keresztül közösen csatlakozik a töltéserősítők földeléséhez, valamint a tápegység (-) kimenetéhez.



44. ábra. NI USB-6211 lábkiosztása

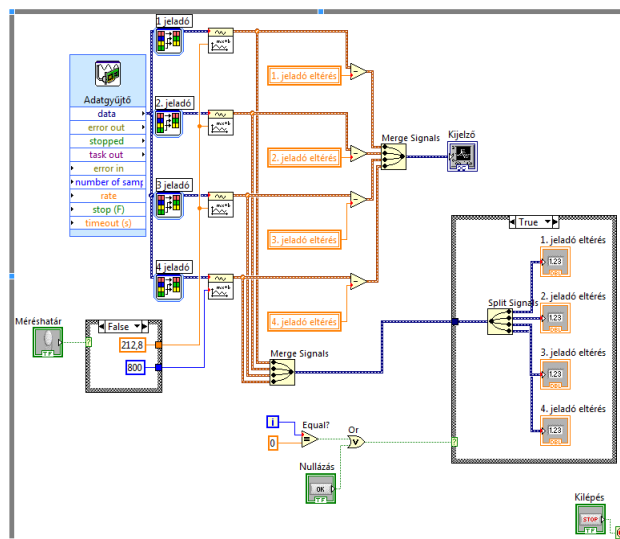
A teljes mérőrendszer egyszerűsített vázlatát a 45. ábra mutatja be.



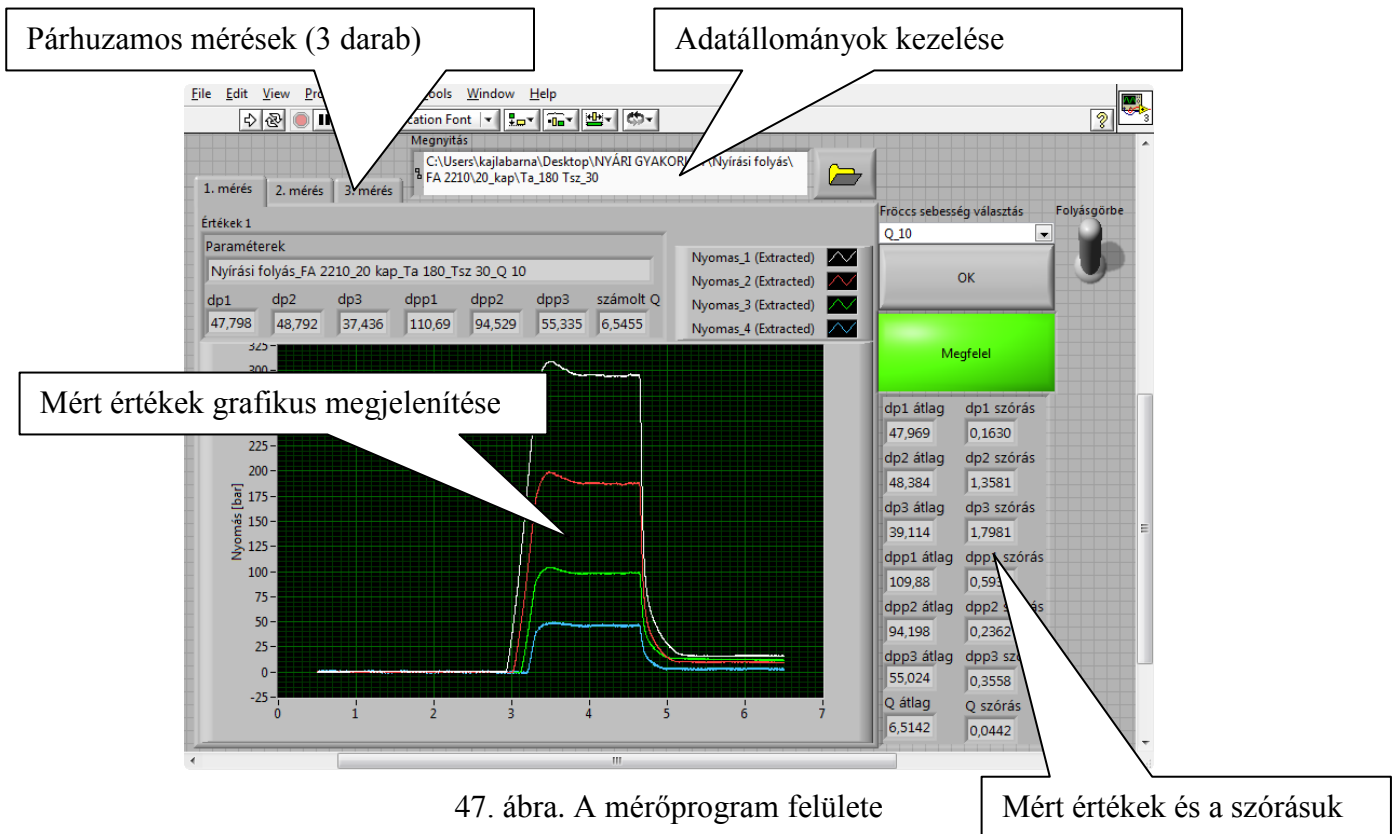
45. ábra. A mérőrendszer blokkvázlata

Mérőprogram

Az analóg-digitális átalakító számítógéphez kapcsolódik, amin az eszközzel is kompatibilis National Instruments LabVIEW szoftverrel valósítható meg a mérés és az adatfeldolgozás. Az általunk készített program egy részlete a 46. ábrán, a mérőprogram felülete a 47. ábrán látható.



46. ábra. A mérőprogram blokkvázlata



A mérőprogramot grafikus szoftver környezetben készítettük el. A mérésekhez a következőket kell megadni:

- a kapilláris betét típusát;
- a mérés körülményeit;
- a párhuzamos mérések számát;
- az adatállományok nevét és a mentések helyét.

A program kezelőfelületén mérés közben láthatjuk a mért nyomásdiagramot, a jellemző nyomásértékeket, a nyomásátlagokat és a szórásokat.

A működőképes rendszer összeállításában legnagyobb problémát a zavarjelek kiszűrése és a mérési eredmények kezelése okozott. A program alkalmas arra, hogy a meghatározott időpontban mért nyomásértékeket és nyomáskülönbségeket egy Excel állományba mentse ki. Az ipari gyakorlatban gyakori megoldás, hogy a mérési eredményeket egy táblázatkezelő programba exportálják és a kiértékelést makró programok segítségével végzik el.

4.2 Felhasznált alapanyag

A mérésekhez PE Tipelin FA 2210 típusú (TVK Nyrt) kissűrűségű polietilén anyagot választottunk. Az anyag stabil folyási jellemzői miatt gyakran választják reológiai vizsgálatokhoz [69, 70], továbbá a magas nyírási és nyújtási viszkozitásának köszönhetően a mérések könnyen elvégezhetők a feldolgozó berendezésen is. Az anyag legfontosabb adatait az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat. Az FA2210 típusjelzésű polietilén jellemzői

Anyag jellemző	Érték
Folyási index MFI(190 °C; 2,16 kg) [g/10 perc]	0,3
Sűrűség (23°C-on) [g/cm ³]	0,922
Legnagyobb viszkozitás [Pas]	90.000
Folyás aktiválási energia [kJ/mol]	31.5

4.3 Felhasznált eszközök, technológia

Méréseinkhez ARBURG Allrounder 270 C 350-70 fröccsöntő gépet használtunk (48. ábra).



48. ábra. Arburg fröccsöntő gép.

A gép legfontosabb paramétereit:

- maximális adagtömeg: 132 g (PS),
- maximális záróerő: 35 tonna,
- zárás: hidraulikus,
- oszloptávolság: 270x270 mm,
- csigaátmérő: 25 mm,
- hatékony csigahossz (L/D): 20,
- max. fröccsnyomás: 1550 bar.

Minden ciklus végén a szerszámból el kell távolítani a megszilárdult anyagot. A szerszámnak nincs kidobó rendszere, így egy angusz kisedő robottal (Wittmann W-702) oldottuk meg a megszilárdult ömledék eltávolítását (49. ábra).



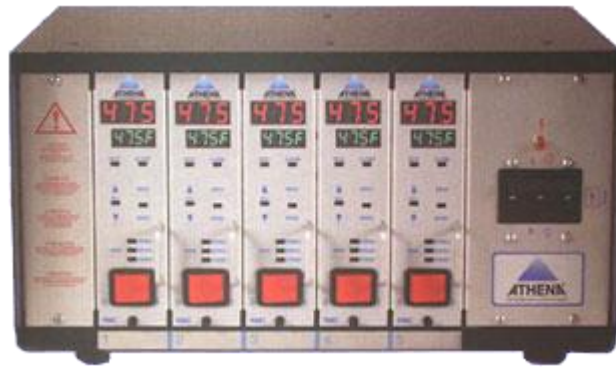
49. ábra. Angusz kisedő robot

A szerszám hőmérsékletét Wittmann Tempro Basic C-90 típusú vizes temperáló berendezéssel (50. ábra) 30°C, 60°C és 90°C-ra állítottuk be.



50. ábra. Wittmann-temperáló.

90°C-os szerszámhőmérséklet felett már vizes temperálást nem lehet használni. Ugyan 140°C-ot nyomott vizes temperálóval el lehet érni, de a feldolgozás hőmérsékleténél még ez is lényegesen alacsonyabb. A szerszámot olyan fűtőrendszerrel egészítettük ki, mely 300°C-ig képes a szerszámhőmérsékletet megemelni. A fűtőrendszerhez Athena fűtött csatorna vezérlőt (51. ábra), J típusú hőelemet és lapfűtést (52. ábra) használtunk.



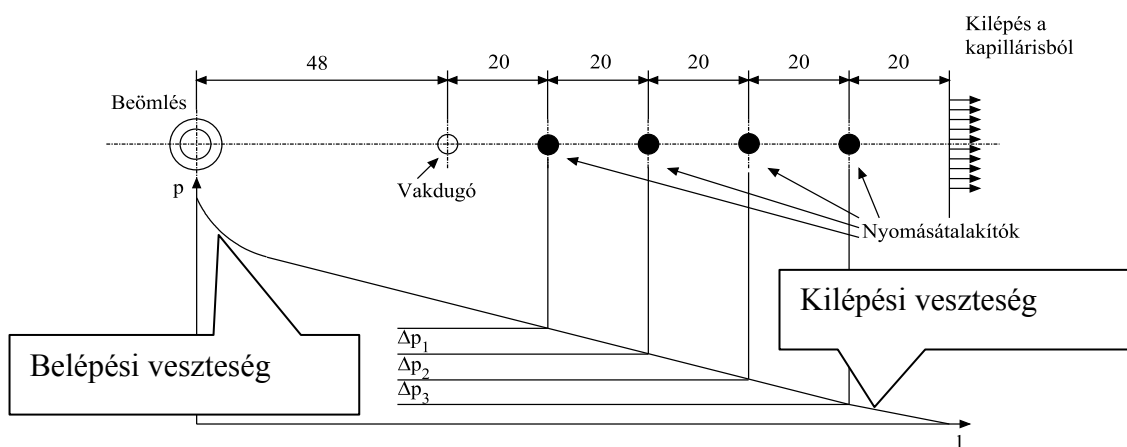
51. ábra. Athena fűtött csatorna hőmérséklet szabályzó-egység



52. ábra. Türk+Hillinger fűtőtest

4.4 Mérési körülmények, primer mérési adatok feldolgozása

A mérési adatok és a kiértékelés könnyebb megértésében segít az 53. ábra. Az ömledék a kúpos beömlő perselyen át jut a réskapillárisba, azon keresztül áramlik és a szerszám kilépési pontján a szabadba távozik. A négy nyomásjeladó egymástól 20 mm távolságra helyezkedik el egymástól. A kapilláris hossz (L_{kap}) az első jeladótól a kilépési pontig: 80 mm. A jeladók pozícióját a kilépési ponttól számoljuk, így az első jeladó a 80 mm-es pozícióban van a leghosszabb kapilláris betétnél. A Bagley-korrekciókhoz három különböző hosszúságú kapillárisokat készítettünk. A mérés során az anyagot „keresztül” fröccsöntjük a szerszámon és fröccsöntési idő alatt tudjuk mérni a kialakult belső nyomást.



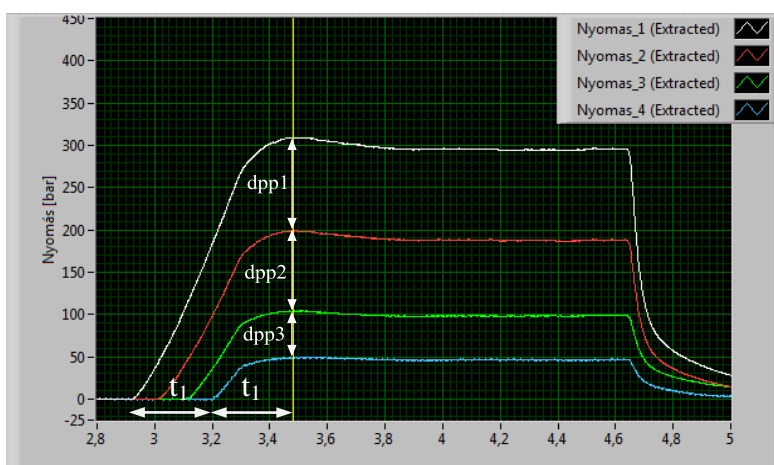
53. ábra. Nyomásjeladók pozíciója, elméleti nyomásfüggvény

Állandó áramlási sebesség mellett a kapillárisban mért nyomáskülönbségből és a két mérési pont közötti úthosszból számítható a nyírófeszültség. Az első jeladóval mért nyomást p_1 -el, a másodikat p_2 -vel, a harmadikat p_3 -mal, a negyediket pedig p_4 -gyel jelöltük. A négy nyomástávadó közötti nyomáscsökkenés három (Δp_x) szakaszra bontható. A nyírófeszültség számításához számos nyomás-út kombinációt használhatunk, melyek közül a következőket találtuk megfelelőnek:

- p_1-p_2 (Δp_1) - L, ahol: L=20 mm,
- p_2-p_3 (Δp_2)- L, ahol: L=20 mm,
- p_1-p_0 - L, ahol: L=80, 65, 45 mm (változó hosszúságú rések esetén),
- p_2-p_0 - L, ahol: L=60, 45, 25 mm (változó hosszúságú rések esetén),
- p_1-p_4 (Δp_{1-4}) - L, ahol: L=60 mm.

A mérés során a mérőprogram meghatározza az első és a negyedik jeladó jelfelfutása között eltelt időt (t_1), majd az utolsó jeladó jelfelfutásának kezdő pillanatától t_1 idő múlva végzi el a

mintavételezést. Ez a módszer bizonyult a legmegbízhatóbbnak, ugyanis a fröccsebesség változásával a kitöltési idő is széles tartományban változik (0,3...5 sec). A jeladók közötti nyomáskülönbség meghatározásának módja az 54. ábrán látható. (Kapilláris kitöltés kezdeti szakaszának (t_1) a vizsgálatával kapcsolatban is született már publikáció [92]. A későbbiekben a berendezés alkalmassá tehető a tranziens első szakasz vizsgálatára is.) A jelfelfutások között eltelt időből a program az áramlási sebességet és abból a valós térfogatáramot is meg tudja határozni. Azonos technológiai beállítás mellett a mért értékek szórása minden esetben kevesebb volt, mint 5%, jellemzően kevesebb, mint 2%. Következésképpen (a berendezés megbízható működésének köszönhetően) három párhuzamos mérés elegendő (46. ábra).



54. ábra. Nyomáskülönbség meghatározása

A fenti mintavételezési algoritmusnak megfelelően kiválasztott nyomásértékeket a mérőprogram Excel táblázatban menti el (6. táblázat).

6. táblázat. A program által lementett táblázat (primer mérési adatok)

Q [cm ³ /s]	p ₁ [bar]	p ₁ szórás [%]	p ₂ [bar]	p ₂ szórás [%]	p ₃ [bar]	p ₃ szórás [%]	p ₄ [bar]	p ₄ szórás [%]
5	65,50	1,255	40,32	0,705	20,43	0,623	12,81	0,748
10	77,77	0,878	47,64	0,434	23,97	0,408	15,01	0,118
20	96,99	0,478	59,97	0,306	29,70	0,412	18,66	0,253
30	109,00	0,293	68,52	0,189	34,19	0,025	21,72	0,517
40	117,03	0,609	74,21	0,531	36,95	0,730	24,11	0,442
50	124,00	0,727	78,77	0,123	39,43	0,226	26,29	0,135
60	128,98	0,628	81,94	0,835	41,39	0,146	28,24	0,370
70	132,56	1,021	84,47	0,883	42,44	0,431	28,37	0,235
80	134,81	1,204	86,44	0,243	43,01	0,170	29,02	0,466
90	137,61	0,819	88,18	0,403	44,56	0,164	29,75	0,891

Mivel a mérés során rendkívül sok paraméter hatását tudjuk vizsgálni (T_a, T_{sz}, v_{frcs} , kapilláris hossz, kapilláris keresztmetszet stb.), ezért a mérőprogram egy fejlett adatbáziskezelő-rendszerrel rendelkezik. A mért anyag típusából, a kapilláris számából, valamint az anyag- és szerszámhőmérsékletből létrehoz egy könyvtárrendszert és minden könyvtárba elmenti a megfelelő nyomásgörbéket az idő függvényében (közvetlenül mért értékek), és a számításhoz használható térfogatáram- és nyomásértékeket (6. táblázat). A paraméterek vizsgálata során hatalmas adatbázis keletkezett. A mérések adatbázisának méretét, szerkezetét a mellékletben található 67. táblázat szemlélteti, ami segíthet a kiértékelés könnyebb megértésében is.

A primer mérési adatokat a melléklet 37-66. táblázataiban foglaltuk össze (8. fejezet). A táblázatok tartalmazzák a térfogatáramokat és a négy nyomásjeladó által mért értéket. A következő csoportokba rendeztük a primer eredményeket:

- azonos hosszúságú és eltérő magasságú kapillárisokkal végzett mérések eredményei;
- azonos keresztmetszetű és eltérő hosszúságú kapillárisokkal végzett mérések eredményei;
- fojtást tartalmazó kapillárisokkal végzett mérések eredményei (nyújtási folyás).

A beállított anyaghőmérséklet 180°C , 200°C és 220°C volt. A szerszámhőmérsékletet vizes temperáló berendezéssel 30°C -ra és 90°C -ra, elektromos fűtéssel pedig az anyag hőmérsékletére, vagyis 180°C -ra, 200°C -ra és 220°C -ra állítottuk be. Hétféle kapillárisot használtunk, így összesen 30 féle beállítás mellett mértünk (7. táblázat).

7. táblázat. Fröccsöntés során beállított paraméterek

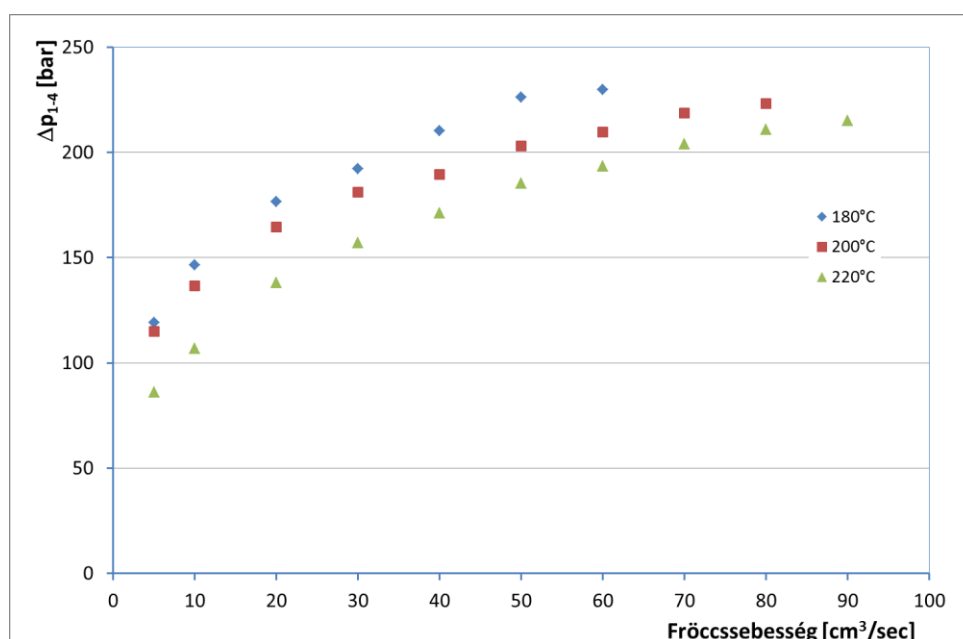
Sorszám	Anyaghőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]	Szerszám hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]	Kapilláris
1	180	30	1, 2, 3
2	200	30	1, 2, 3, 23
3	220	30	1, 2, 3
4	180	90	1, 2, 3, 23
5	200	90	1, 2, 3
6	220	90	1, 2, 3, 23
7	180	180	20, 21, 22
8	200	200	20, 21, 22
9	220	22	20, 21, 22

Minden beállítás során több fröccsöntési sebességgel mértünk. Amennyiben lehetett, akkor a méréseket $5\text{ cm}^3/\text{sec}$ és $90\text{ cm}^3/\text{sec}$ között 10 lépcsőben változtattuk. Egyes beállításoknál a nagyon kicsi, illetve a nagyon nagy sebesség nem volt stabilan tartható, ezért azokat nem vettük figyelembe a kiértékelésnél. A fröccsöntések során az alábbi gépbeállítási paramétereket tartottuk állandó értéken (8. táblázat).

8. táblázat. Konstans gépbeállítási paraméterek

Paraméter	Érték
Torlónyomás	20 bar
Adagolási sebesség	150 mm/s
Fröccsnyomás	1500 bar
Utónyomás	0 bar
Átkapocslási pont	1 cm ³

A 80 mm mérési hosszúságú és 2 mm vastag (22-es betét) kapillárisal végzett mérések eredményei az 55. ábrán láthatók. A szerszámhőmérséklet azonos volt az anyaghőmérséklettel.



55. ábra. Primer mérési eredmények Δp_{1-4} a fröccssebesség függvényében (22-es betét)

4.5 Mérési eredmények kiértékelése

Próbaméréseket végeztünk olyan alapanyagokon, amelyek folyóképessége széles tartományban változott (MFI=0,2...55). Elsősorban poliolefinekkel dolgoztunk (LDPE, HDPE, PP-H, PP-K, PP-R), mert ezen anyagok szerkezete erősen eltérő és a nyomásjeladó szenzorok 300°C-ig használhatók, az anyagok feldolgozási hőmérséklete pedig alacsonyabb. Ezt követően TIPOLEN FA2210-es polietilént, több kapilláris betéttel és technológiai beállítással vizsgálatunk. Ezt követően meghatároztuk az anyag reológiai paramétereit és azokat összevetettük a már létező szabványos berendezéssel meghatározott jellemzőkkel. Ezen mérési eredmények felhasználásával mutatjuk be a kiértékelés menetét. A számításokhoz szükséges összefüggéseket a 3. fejezetben már részben ismerttettem.

A számításokat a következő csoportokba sorolhatjuk:

- nyíróviszkozitás számítása;
- dimenziómentes mennyiségek és a viszkozitás nyomás- és hőmérsékletfüggésének a meghatározása;
- nyújtási viszkozitás meghatározása.

4.5.1 Nyíróáramban végrehajtott mérések

A nyíróáramlásban végzett mérések célja a nyíróviszkozitás nyírósebesség (nyírófeszültség), valamint a normálviszkozitás nyírósebesség (nyírófeszültség) függésének meghatározása. Az előbbit a fal menti nyírófeszültségből és nyírósebességből, míg az utóbbit a kilépési nyomásból és nyírósebességből számíthatjuk.

Falhatás korrekció számítása

Az első korrekciós számítás során az áramlási csatorna oldalfalának hatását vesszük figyelembe, mivel a kapillárisok szélesség-vastagság aránya kisebb, mint 1:10. A falhatást módosító tényezők az alkalmazott kapilláris betétekre a 9. táblázatban szerepelnek.

9. táblázat. Falhatást módosító tényezők [75]

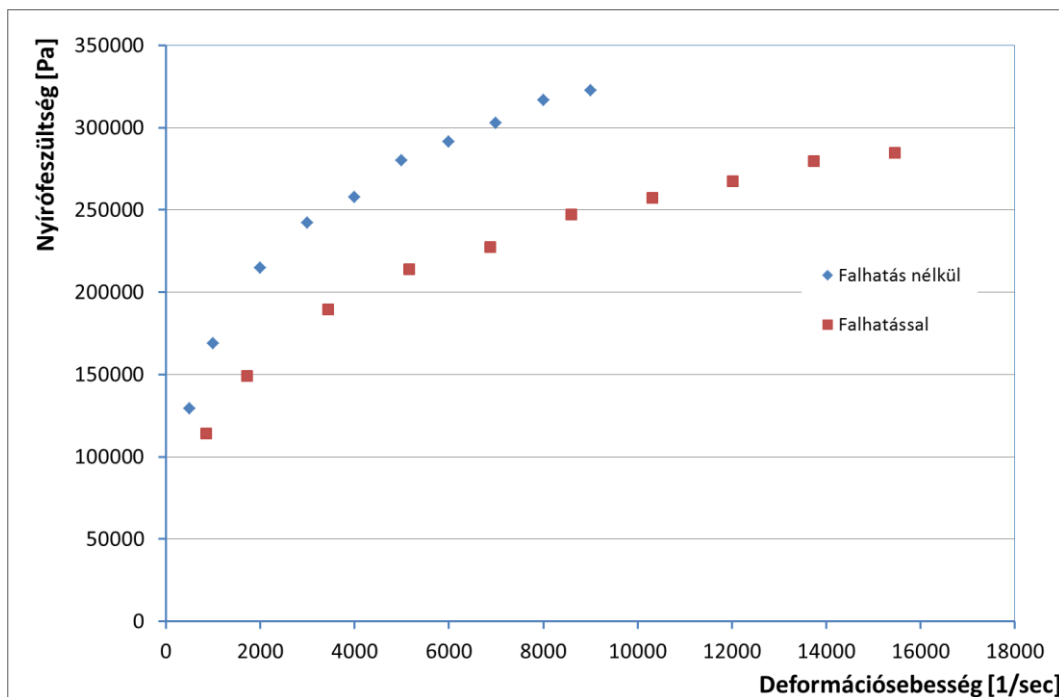
h [mm]	h/W	a	b	f
2	0,133	0,4120	0,8980	0,8664
3	0,200	0,3475	0,8444	0,7946
4	0,266	0,3175	0,8184	0,7550

A 9. táblázatba foglalt állandókkal a nyírófeszültség, 10. táblázatban pedig a nyírósebességet módosító tényezők vannak összefoglalva.

10. táblázat. Korrekciós tényezők

h [mm]	Nyírófeszültség	Nyírósebesség
2	0,8800	(1,04+0,48/n)
3	0,8333	(1,067+ 0,44/n)
4	0,7900	(1,060+0,42/n)

Az 56. ábra a látszólagos (mért) és a falhatást figyelembe vevő látszólagos folyásgörbét szemlélteti. Jól látható a módosító tényezők nyírósebességre és nyírófeszültségre kifejtett hatása. A korrekció után a nyírósebességet $\dot{\gamma}^*$ -gal, a nyírófeszültséget pedig τ^* -gal jelöljük.



56. ábra. Falhatást figyelembe vevő korrekciós tényező hatása (22-es betét) $T_a=T_{sz}=200^\circ\text{C}$

Azonos hosszúságú, de eltérő magasságú kapillárisokkal végrehajtott mérések

A kiértékelés bemutatásához a 180°C -os anyag- és szerszámhőmérséklettel valamint az 1-es, 2-es, a 3-as kapillárisal mért eredményeket mutatom be részletesen.

Falcsúszás meghatározása

A csúszás hatásának vizsgálatára az 1-es, 2-es és 3-as kapilláris betétekkel mért adatokat felhasználjuk, ezek vastagsága eltérő, hosszuk azonos. A 3.4.4 fejezetben ismertetett (87) és (88) egyenletek mintájára a résben bekövetkező csúszás az alábbi összefüggéssel határozható meg:

$$\gamma_{app} = \frac{6Q}{wh^2} = \dot{\gamma} + \frac{6v}{h}, \quad (99)$$

Az előzőleg korigált értékeket felhasználva a $\log \tau^* - \log \dot{\gamma}^*$ regressziós egyenesek alapján kiválasztott nyírófeszültség értékhez tartozó nyírósebességeket határozzuk meg. Az azonos

nyírófeszültséghez tartozó nyírósebességek ábrázoljuk az L/h függvényében. A kapott egyenesek meredekségéből a csúszás térfogatárama meghatározható (v_{cs}).

A 11-13. táblázatok a 180°C -os anyag- és a 30°C -os szerszámhőmérséklettel meghatározott $\log \tau^{*}$ – $\log \dot{\gamma}^{*}$ értékeket tartalmazzák.

11. táblázat ($T_a=180^{\circ}\text{C}$; $T_{sz}=30^{\circ}\text{C}$; 1. kapilláris)

$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [Pa]	$\lg \dot{\gamma}$	$\lg \tau$	$\dot{\gamma}^{*}$	$\lg \dot{\gamma}^{*}$	$\lg \tau^{*}$
500	423207,4	2,69	5,62	2371,9	3,37	5,57
1000	431838	3,00	5,63	4743,9	3,67	5,58
2000	459553,7	3,30	5,66	9487,9	3,97	5,60
3000	484041,9	3,47	5,68	14231,9	4,15	5,63
4000	494888,2	3,60	5,69	18975,8	4,27	5,64
5000	491984,6	3,69	5,69	23719,8	4,37	5,63
6000	485110,1	3,77	5,68	28463,8	4,45	5,63

$$\lg \tau^{*} - \lg \dot{\gamma}^{*}: \lg \tau^{*} = 0,0792 \lg \dot{\gamma}^{*} + 5,406$$

$$\lg \dot{\gamma}^{*} - \lg \tau^{*}: \lg \dot{\gamma}^{*} = 12,044 \lg \tau^{*} - 64,962$$

12. táblázat ($T_a=180^{\circ}\text{C}$; $T_{sz}=30^{\circ}\text{C}$; 2. kapilláris)

$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [Pa]	$\lg \dot{\gamma}$	$\lg \tau$	$\dot{\gamma}^{*}$	$\lg \dot{\gamma}^{*}$	$\lg \tau^{*}$
222	316609,6	2,34	5,50	484	2,684	
444	376711,6	2,64	5,57	968	2,985	5,496
888	403484	2,94	5,60	1936	3,286	5,526
1333	426203,9	3,12	5,62	2904	3,462	5,550
1777	445805,6	3,24	5,64	3872	3,587	5,569
2222	462244,7	3,34	5,66	4840	3,684	5,585
2666	473984,2	3,42	5,67	5808	3,764	5,596
3111	487481,5	3,49	5,68	6776	3,830	5,608
3555	496673,9	3,55	5,69	7744	3,888	5,616

$$\lg \tau^{*} = 0,1364 \lg \dot{\gamma}^{*} + 5,2086$$

$$\lg \dot{\gamma}^{*} = 7,2635 \lg \tau^{*} - 37,802$$

13. táblázat ($T_a=180\text{ °C}$; $T_{sz}=30\text{ °C}$; 3. kapilláris)

$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [Pa]	$\lg \dot{\gamma}$	$\lg \tau$	$\dot{\gamma}^*$	$\lg \dot{\gamma}^*$	$\lg \tau^*$
250	259276,2	2,397	5,4137	509	2,706	5,3113
500	287734	2,698	5,4589	1018	3,007	5,3565
750	315545,5	2,875	5,4990	1527	3,184	5,3966
1000	335930,6	3	5,5262	2036	3,308	5,4238
1250	356884,8	3,096	5,5525	2546	3,405	5,4500
1500	371478,4	3,176	5,5699	3055	3,485	5,4675
1750	382987,5	3,243	5,5831	3564	3,552	5,4807
2000	394461,2	3,301	5,5960	4073	3,609	5,4935
2250	406382,3	3,352	5,6089	4582	3,661	5,5065

$$\lg \tau^* = 0,2296 \lg \dot{\gamma}^* + 4,892$$

$$\lg \dot{\gamma}^* = 4,3523 \lg \tau^* - 21,6$$

A falcsúzás meghatározásához szükséges eredményeket a 14-16. táblázatokban foglaltuk össze, és az 57-59. ábrákon szemléltetjük. Jól látható, hogy a kapott egyenesek meredeksége minden esetben negatív volt, ami azt jelenti, hogy falcsúzással nem kell számolni.

14. táblázat. Falcsúzás számítása ($T_a=180\text{ °C}$; $T_{sz}=30\text{ °C}$)

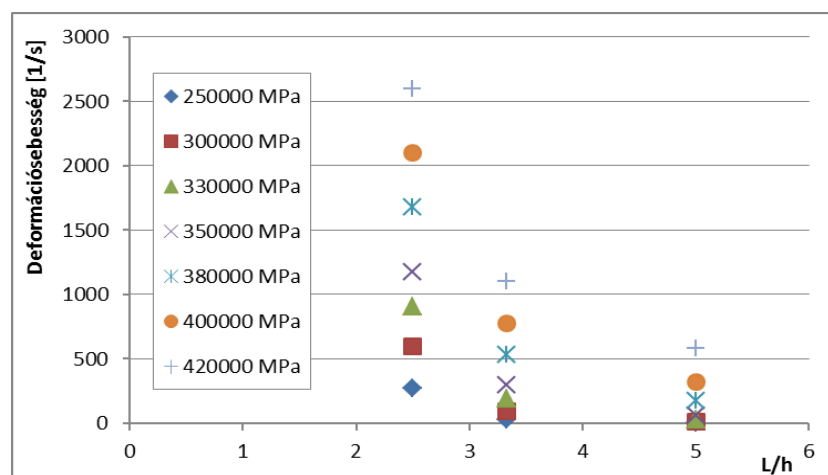
τ [Pa]	$\lg \tau$	$\dot{\gamma}_{2\text{mm}} =$ 12,044x- 64,962	$\dot{\gamma}_{3\text{mm}} =$ 7,2635x- 37,82	$\dot{\gamma}_{4\text{mm}} =$ 4,3523x- 21,06	$(\dot{\gamma}_{2\text{mm}})$ [1/s]	$(\dot{\gamma}_{3\text{mm}})$ [1/s]	$(\dot{\gamma}_{4\text{mm}})$ [1/s]
250000	5,397	0.051	1.406	2.433	1	25	271
300000	5,477	1.004	1.981	2.778	10	96	600
350000	5,544	1.503	2.282	2.958	32	191	908
400000	5,602	1.811	2.467	3.069	65	293	1173
450000	5,653	2.241	2.727	3.225	174	533	1678
480000	5,681	2.509	2.889	3.322	323	774	2098

15. táblázat. Falcsúszás számítása ($T_a=200^\circ\text{C}$; $T_{sz}=30^\circ\text{C}$)

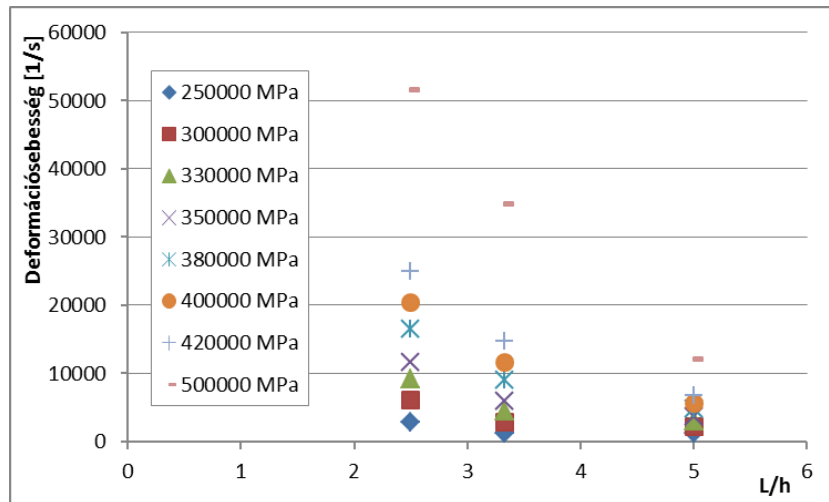
τ [Pa]	$\lg \tau$	$\dot{\gamma}_{2\text{mm}}=$ 3.3912x- 15.246	$\dot{\gamma}_{3\text{mm}}=$ 4.9368x- 23.593	$\dot{\gamma}_{4\text{mm}}=$ 4.1626x- 19.01	$(\dot{\gamma}_{2\text{mm}})$ [1/s]	$(\dot{\gamma}_{3\text{mm}})$ [1/s]	$(\dot{\gamma}_{4\text{mm}})$ [1/s]
250000	5.39794	3.059494	3.05555	3.459465	1146	1136	2880
300000	5.477121	3.328014	3.446452	3.789065	2128	2795	6152
330000	5.518514	3.468384	3.6508	3.961366	2940	4475	9148
350000	5.544068	3.555044	3.776955	4.067738	3589	5983	11687
380000	5.579784	3.676162	3.953276	4.216407	4744	8979	16459
400000	5.60206	3.751706	4.06325	4.309135	5645	11567	20376

16. táblázat. Falcsúszás számítása ($T_a=220^\circ\text{C}$; $T_{sz}=30^\circ\text{C}$)

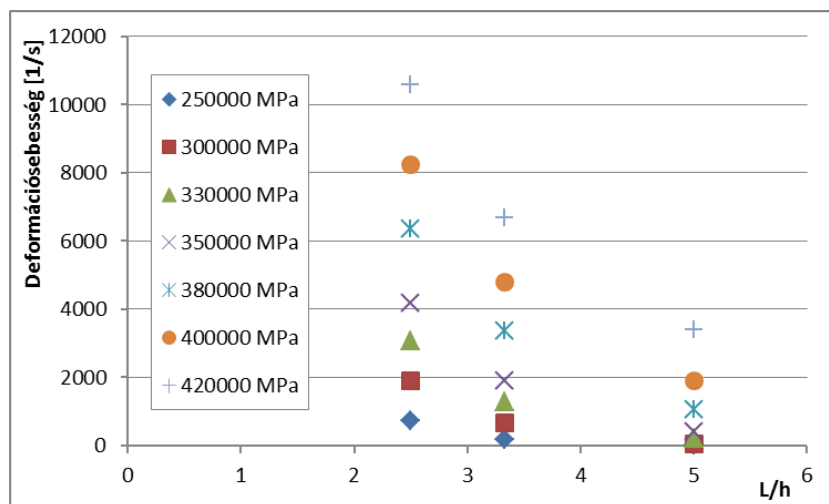
τ [Pa]	$\lg \tau$	$\dot{\gamma}_{2\text{mm}}=$ 11.838x- 63.036	$\dot{\gamma}_{3\text{mm}}=$ 6.8774x- 34.848	$\dot{\gamma}_{4\text{mm}}=$ 5.1183x- 24.757	$(\dot{\gamma}_{2\text{mm}})$ [1/s]	$(\dot{\gamma}_{3\text{mm}})$ [1/s]	$(\dot{\gamma}_{4\text{mm}})$ [1/s]
250000	5.39794	0.864814	2.275793	2.871276	7.325104	188	743
300000	5.477121	1.802161	2.820354	3.27655	63.41053	661	1890
330000	5.518514	2.292168	3.105028	3.48841	195.9603	1273	3079
350000	5.544068	2.594678	3.280774	3.619203	393.2579	1908	4161
380000	5.579784	3.017478	3.526404	3.802006	1041.066	3360	6338
400000	5.60206	3.281186	3.679607	3.916024	1910.672	4781	8241



57. ábra. Falcsúszás meghatározása ($T_a=180^\circ\text{C}$; $T_{sz}=90^\circ\text{C}$)



58. ábra. Falcsúszás meghatározása ($T_a=200^\circ\text{C}$; $T_{sz}=90^\circ\text{C}$)



59. ábra. Falcsúszás meghatározása ($T_a=220^\circ\text{C}$; $T_{sz}=90^\circ\text{C}$)

A következő lépés a Bagley-korrekciónak és a kilépési nyomás meghatározásának. A számításhoz szükséges a primer mérési adatokból ($T_a=180^\circ\text{C}$; $T_{sz}=30^\circ\text{C}$, 1-es, 2-es és 3-as kapilláris) meghatározott $\log \dot{\gamma}^* - \log \tau$ egyenesek egyenletei:

1. kapilláris $\lg \tau^* - \lg \dot{\gamma}^* : \lg \tau^* = 0,0792 \lg \dot{\gamma}^* + 5,406,$

2. kapilláris $\lg \tau^* - \lg \dot{\gamma}^* : \lg \tau^* = 0,1364 \lg \dot{\gamma}^* + 5,2086,$

3. kapilláris: $\lg \tau^* - \lg \dot{\gamma}^* : \lg \tau^* = 0,2296 \lg \dot{\gamma}^* + 4,892.$

A fenti összefüggéseket felhasználva a számításokhoz szabadon veszünk fel nyírósebesség értékeket, majd az egyenletekbe behelyettesítve megkapjuk a három - 2, 3 és 4 mm vastagságú - kapillárisban ébredő nyíró feszültséget (17. táblázat).

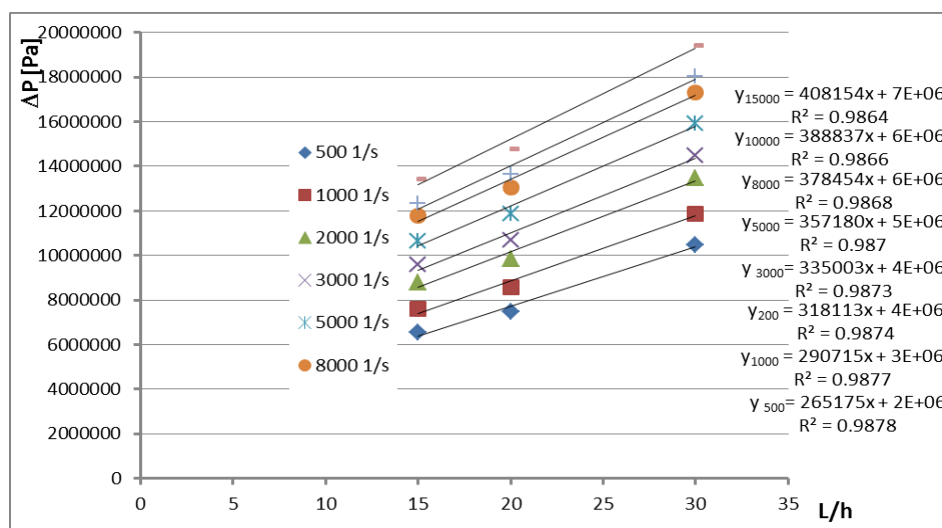
17. táblázat. Bagley-korrekción változó kapilláris magasságra

$\dot{\gamma}$ [1/s]	$\lg \dot{\gamma}$	$\lg \tau_{2\text{mm}} =$ 0,182 $\dot{\gamma}$ +4,75	$\lg \tau_{3\text{mm}} =$ 0,2009 $\dot{\gamma}$ +4,8287	$\lg \tau_{4\text{mm}} =$ 0,2010 $\dot{\gamma}$ +4,7316	$\tau_{2\text{mm}}$ [Pa]	$\tau_{3\text{mm}}$ [Pa]	$\tau_{4\text{mm}}$ [Pa]
500	2,69897	5,241213	5,370923	5,300003	174266	234921	199527
1000	3	5,296	5,4314	5,3634	197697	270022	230887
2000	3,30103	5,350787	5,491877	5,426797	224278	310368	267175
3000	3,477121	5,382836	5,527254	5,463882	241454	336708	290992
5000	3,69897	5,423213	5,571823	5,510603	264979	373098	324043
8000	3,90309	5,460362	5,612831	5,553591	288643	410044	357759
10000	4	5,478	5,6323	5,574	300607	428844	374973
15000	4,176091	5,510049	5,667677	5,611085	323630	465239	408399

$\tau_{2\text{mm}}$, $\tau_{3\text{mm}}$, $\tau_{4\text{mm}}$ a 2, 3 és 4 mm-es kapillárisban ébredő nyírófeszültség az adott nyírósebességeknél.

A $\tau_{2\text{mm}}$, $\tau_{3\text{mm}}$ és a $\tau_{4\text{mm}}$ értékét ismerve a belső nyomásesés visszaszámolható a kapillárisokra (18. táblázat).

Az 60. ábra a 180°C-os anyaghőmérséklettel és a 30°C-os szerszámhőmérséklettel mért eredményekből számolt Bagley-egyeneseket szemlélteti.



60. ábra. Bagley-korrekción egyenesei és az egyenesek egyenletei

Az L/h függvényében ábrázolt nyírófeszültségek meredekségének a kétszerese a valós nyírófeszültség, melyet felhasználva a viszkozitás és a folyásgörbe már meghatározható. A

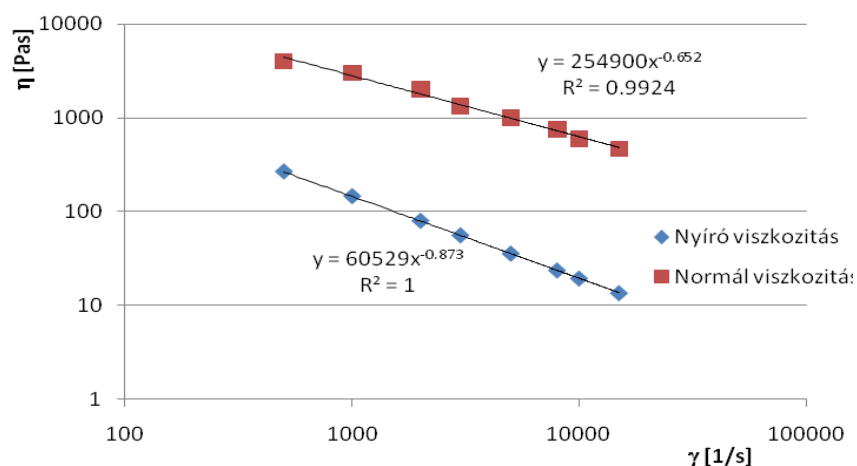
tengelymetszeteket a normálviszkózitás meghatározásában használandók fel. A meghatározott viszkózitás értékeket a 19. táblázatban és a 61. ábrán foglaltuk össze.

18. táblázat. Számolt nyomásesések a korrekciót követően

$\dot{\gamma}$ [1/s]	ΔP_{2mm} [Pa]	ΔP_{3mm} [Pa]	ΔP_{4mm} [Pa]
500	10455957	9396867	5985829
1000	11861818	10800901	6926618
2000	13456704	12414720	8015270
3000	14487296	13468327	8729774
5000	15898780	14923925	9721300
8000	17318634	16401772	10732775
10000	18036458	17153786	11249190
15000	19417793	18609587	12251974

19. táblázat. Nyíró és normálviszkózitás ($T_a=180^\circ\text{C}$, $T_{sz}=90^\circ\text{C}$)

$\dot{\gamma}$ [1/s]	$\eta_{nyíró}$ [Pas]	$\eta_{normál}$ [Pas]
100	1085	12415
300	415	6037
500	266	4318
800	176	3172
1000	145	2740
3000	55	1332
5000	35	953



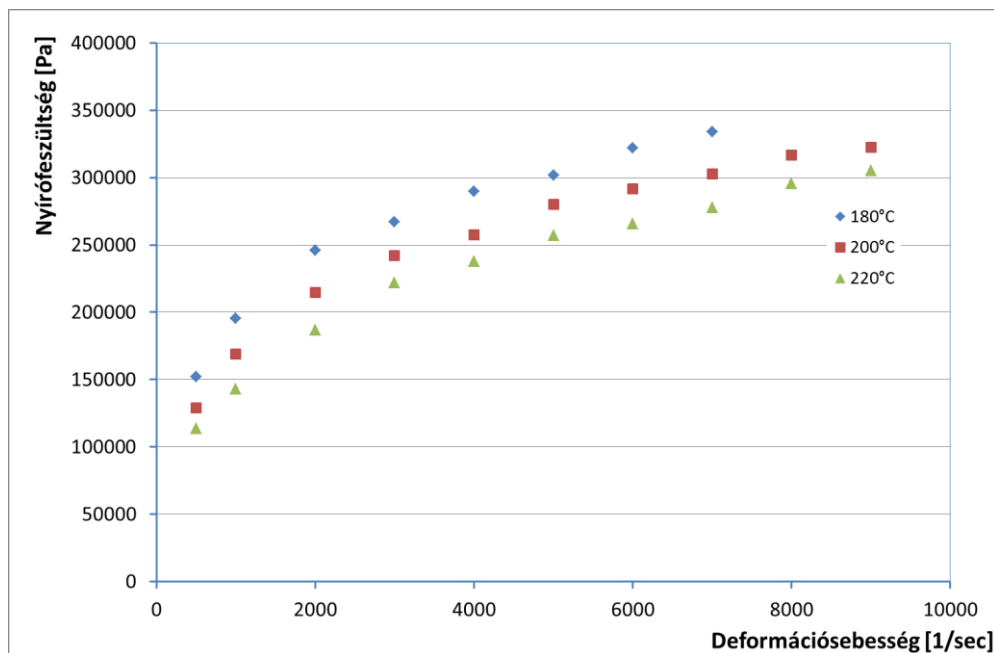
61. ábra. Viszkózitásgörbék a korrekciók után ($T_a=180^\circ\text{C}$; $T_{sz}=30^\circ\text{C}$)

Mérések különböző hosszúságú kapillárisokkal

A korrigálatlan nyírósebesség és nyírófeszültség értékeket a (41)-(46) egyenletekkel határozhatjuk meg. A korrigálatlan nyírófeszültséget többek között a következő érték párokból számolhatjuk:

- Δp_1 -L; L=20 mm;
- Δp_2 -L; L=20 mm;
- p_1 -L; L=80, 65, 45 mm (változó hosszúságú rések);
- p_2 -L; L=60, 45, 25 mm (változó hosszúságú rések).

A Δp_1 nyomáskülönbség és a két jeladó közötti úthossz felhasználásával, a 80 mm-es kapillárisal mért, 180°C-, 200°C- és 220°C-os anyaghőmérsékletre tartozó látszólagos folyásgörbék a 62. ábrán láthatók.

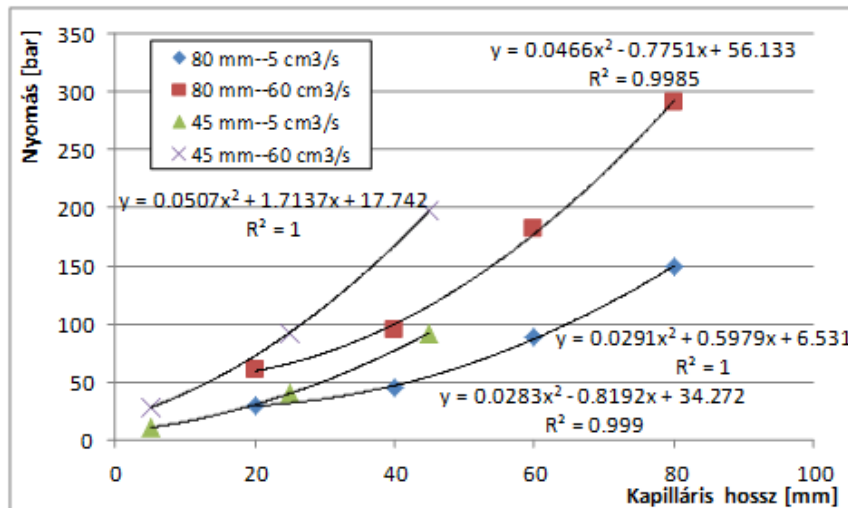


62. ábra. Korrekciómentes folyásgörbék (22-es betét) $T_a=T_{sz}$

A változó hosszúságú és kersztmetszetű kapilláris betétekkel mért eredményeket a korrekciók meghatározására, a rendszer működésének elemzésére használtuk fel.

Belépési és kilépési veszteségek (Bagley-korrekción)

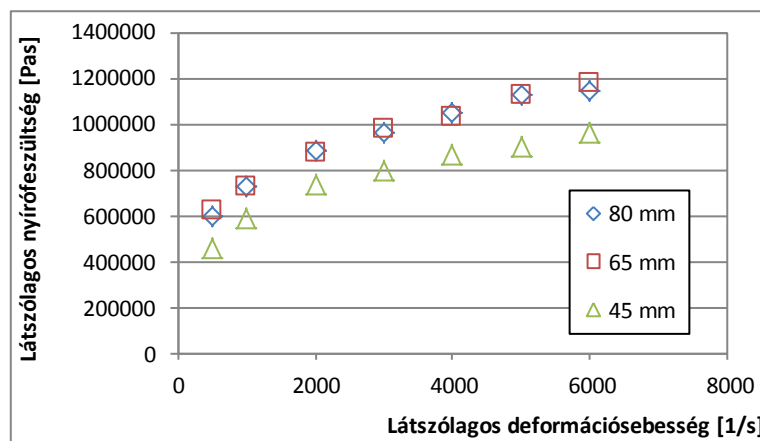
A kapillárisba történő be-, és kilépéskor nyomásvesztéssel kell számolni (53. ábra). Mivel a kapilláris hossza mentén több jeladót helyeztünk el, a belső nyomásfüggvényt különböző beállítások mellett tudjuk meghatározni (63. ábra). A mérésekhez a 2 mm vastag és a változó hosszúságú betéteket alkalmaztunk. A kapilláris hosszúságát az első jeladótól számítjuk a kilépési pontig (53. ábra).



63. ábra. Nyomáseloszlás a kapilláris hossza mentén ($T_a=T_{sz}=180^\circ\text{C}$)

A 63. ábrán a résben kialakult belső nyomás látható a kapilláris hosszának függvényében. Alacsony ($5\text{ cm}^3/\text{sec}$) és nagy ($60\text{ cm}^3/\text{sec}$) térfogatárammal mért értékek láthatók, a 80 mm-es és a 45 mm-es kapillárisal mérve. A kilépési zóna közelében a belső nyomás határértékhez tart. A kilépési nyomás 2 mm-es kapilláris magasság esetén 15...60 bar között változott.

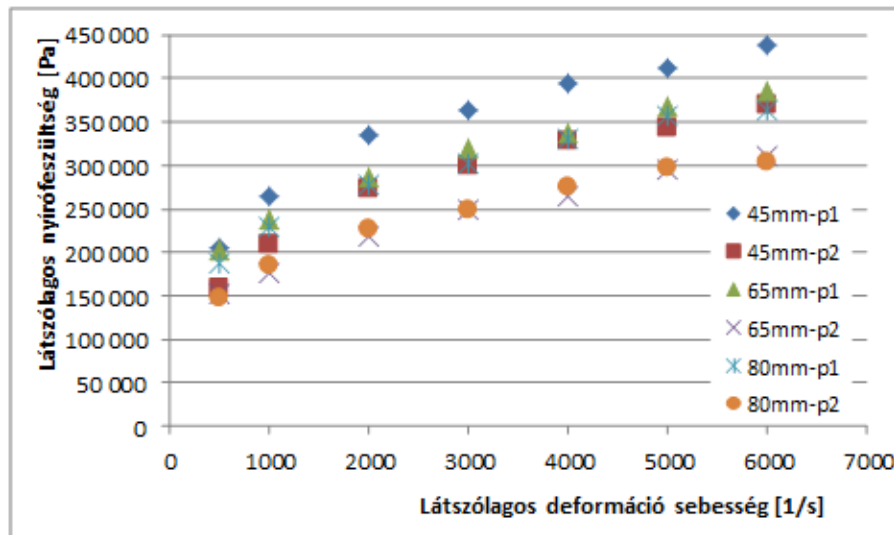
A 64. ábrán a látszólagos nyírófeszültség látható, az első és a második jeladó közötti nyomáskülönbségből határozva. A legrövidebb kapilláris esetén (45 mm) a látszólagos nyírófeszültség lényegesen alacsonyabb, mint a másik két esetben. Ez az előzőekben már bemutatott kapilláris-végthatással magyarázható. Mivel a másik két kapilláris-hosszal a látszólagos értékek azonosak, így az első és második jeladóval mért nyomások a kapilláris végthatásának megjelenését megelőző szakaszban vannak.



64. ábra. A kapilláris hosszának hatása a látszólagos nyírófeszültségre ($T_a=T_{sz}=180^\circ\text{C}$)

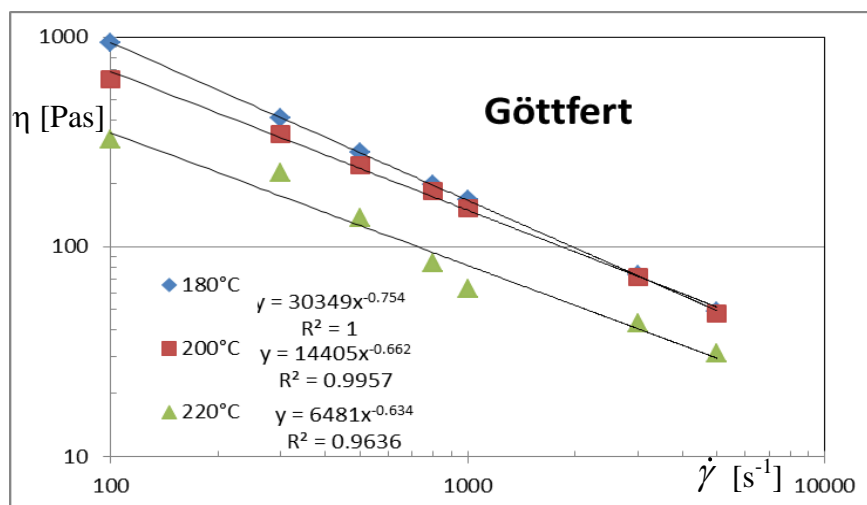
(A nyírófeszültséget az első és a második jeladó nyomásának különbségéből és a köztük lévő távolságból határoztuk meg.)

Az első jeladó a belépési ponttól 68 mm-re található. A következő számításban a belépési veszteség hatását vizsgáljuk. A 60. ábrán két kapilláris hosszúsággal, a p_1 és p_2 jeladókkal mért nyomásból és a folyási útból (az adott jeladótól a csatorna végéig tartó szakasz) meghatározott látszólagos folyásgörbe látható. A 45 mm-es, viszonylag rövid csatorna-szakasszal lényegesen nagyobb nyírófeszültséget számoltunk és a p_1 -es, és p_2 -es jeladó értékeiből számolt mennyiségek is különbözőek.

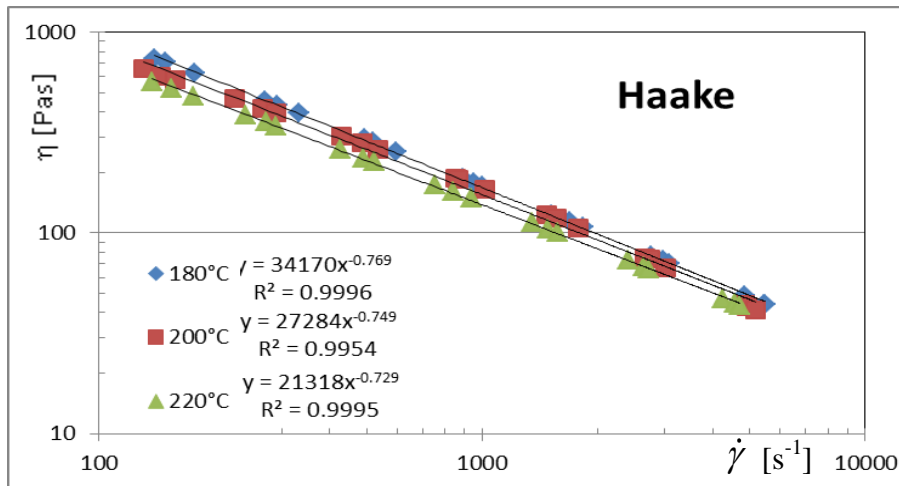


65. ábra. A kapilláris hosszának és a mérés helyének hatása a látszólagos nyírófeszültségre ($T_a=T_{sz}=180^\circ\text{C}$)

A nyírófeszültséget az első és a második jeladó nyomásából és a folyási útból határoztuk meg (L). A fenti gondolatmenet alapján megállapíthatjuk, hogy ezzel a szerszámkonstrukcióval az ömledékek valós folyásgörbéje Bagley-korrektció nélkül nem határozható meg. A 66. és 67. ábrák két különböző berendezéssel (Göttfert Rheograph kapilláris reométer, Haake extruziométer) meghatározott viszkozitás-görbék mutatnak be.



66. ábra. Göttfert reométerrel meghatározott viszkozitás-görbék



67. ábra. Haake reométerrel meghatározott viszkozitásgörbék

Változó hosszúságú kapillárisal végzett mérések (20-as, 21-es és 22-es betét)

A mérések kiértékeléséhez a p_1 -es nyomást használtuk, a jeladó és a kilépési pont közötti távolságot használtuk a nyírófeszültség meghatározásához. A kiértékelés menete megegyezik az előzőkkel, csak a kapilláris keresztmetszete állandó és a hosszúsága változik. Az egyes kapillárisokkal számolt értékeket a 20-22. táblázatok tartalmazzák.

20. táblázat. Folyásgörbe meghatározása ($T_a=180^\circ\text{C}$; $T_{sz}=180^\circ\text{C}$ $L_{kap}=80$ mm)

$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [Pa]	$\lg \dot{\gamma}$	$\lg \tau$	$\dot{\gamma}^*$	τ^*	$\lg \dot{\gamma}^*$	$\lg \tau^*$
500	237293	2.69897	5.375286	992.0882	208818	2.99655	5.319769
1000	286902	3.00000	5.457734	1984.176	252473	3.29758	5.402216
2000	345028	3.30103	5.537855	3968.353	303625	3.59861	5.482338
3000	375957	3.47712	5.575139	5952.529	330842	3.774702	5.519621
4000	394311	3.60206	5.595840	7936.706	346994	3.89964	5.540322
5000	394644	3.69897	5.596206	9920.882	347287	3.99655	5.540689
6000	394356	3.77815	5.595889	11905.06	347033	4.075732	5.540371

$$\tau^* = 0,24794 \lg \dot{\gamma}^* + 4,582$$

21. táblázat. Folyásgörbe meghatározása ($T_a=180^\circ\text{C}$; $T_{sz}=180^\circ\text{C}$ $L_{kap}=65$ mm)

$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [Pa]	$\lg \dot{\gamma}$	$\lg \tau$	$\dot{\gamma}^*$	τ^*	$\lg \dot{\gamma}^*$	$\lg \tau^*$
500	165323.4	2.69897	5.218334	1019.218	145484.6	3.008267	5.162817
1000	201421.4	3.00000	5.304106	2038.436	177250.9	3.309297	5.248588
2000	241664	3.30103	5.383212	4076.873	212664.3	3.610327	5.327695
3000	261512	3.477121	5.417492	6115.309	230130.6	3.786418	5.361974
4000	279401.7	3.60206	5.446229	8153.745	245873.5	3.911357	5.390712
5000	292372.6	3.69897	5.465937	10192.18	257287.9	4.008267	5.410419
6000	305844.5	3.778151	5.485501	12230.62	269143.1	4.087448	5.429983
7000	316693.1	3.845098	5.500639	14269.05	278689.9	4.154395	5.445121

$$\log \dot{\gamma}^* - \log \tau^*: \quad \tau^* = 0,23791 \lg \dot{\gamma}^* + 4,4575$$

22. táblázat. Folyásgörbe meghatározása ($T_a=180^\circ\text{C}$; $T_{sz}=180^\circ\text{C}$ $L_{kap}=45$ mm)

$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [Pa]	$\lg \dot{\gamma}$	$\lg \tau$	$\dot{\gamma}^*$	τ^*	$\lg \dot{\gamma}^*$	$\lg \tau^*$
500	145556.4	2.69897	5.163031	951.8104	128089.6	2.97855	5.107514
1000	172831	3.00000	5.237622	1903.621	152091.2	3.27958	5.182104
2000	215538.8	3.30103	5.333525	3807.242	189674.2	3.58061	5.278008
3000	242313.5	3.477121	5.384378	5710.862	213235.9	3.756702	5.32886
4000	260088.7	3.60206	5.415121	7614.483	228878	3.88164	5.359604
5000	275574.6	3.69897	5.440239	9518.104	242505.6	3.97855	5.384722
6000	286626.5	3.778151	5.457316	11421.72	252231.4	4.057732	5.401799
7000	294586.6	3.845098	5.469213	13325.35	259236.2	4.124678	5.413696
8000	299599.4	3.90309	5.476541	15228.97	263647.5	4.18267	5.421024
9000	305809.6	3.954243	5.485451	17132.59	269112.4	4.233823	5.429934

$$\lg \tau^* = 0,2644 \lg \dot{\gamma}^* + 4,3247$$

A Bagley-korrekcióhoz szükséges számítást és a meghatározott értékeket a három hőmérsékletre a 23-25. táblázatok foglalják össze.

23. táblázat. Bagley-korrekció változó kapilláris hosszúságra ($T_a=T_{sz}=180^\circ\text{C}$)

$\dot{\gamma}$ [1/s]	$\lg \dot{\gamma}$	$\lg \tau_{80\text{mm}} = 0,2479 \dot{\gamma} + 4,582$	$\lg \tau_{65\text{mm}} = 0,2379 \dot{\gamma} + 4,4575$	$\lg \tau_{45\text{mm}} = 0,2644 \dot{\gamma} + 4,3247$	$\tau_{80\text{mm}}$ [Pa]	$\tau_{65\text{mm}}$ [Pa]	$\tau_{45\text{mm}}$ [Pa]
100	2.000000	5.0778	4.9333	4.8535	119619	85763	71367
300	2.477121	5.196078	5.046807	4.979651	157064.6	111380	95422
500	2.69897	5.251075	5.099585	5.038308	178268.5	125772	109221
800	2.90309	5.301676	5.148145	5.092277	200297.7	140651	123673
1000	3.00000	5.3257	5.1712	5.1179	211689.8	148320	131189
3000	3.477121	5.443978	5.284707	5.244051	277957.5	192622	175408
5000	3.69897	5.498975	5.337485	5.302708	315482.1	217512	200774

24. táblázat. Bagley-korrekció változó kapilláris hosszúságra ($T_a=T_{sz}=200^\circ\text{C}$)

$\dot{\gamma}$ [1/s]	$\lg \dot{\gamma}$	$\lg \tau_{80\text{mm}} = 0,2758 \dot{\gamma} + 4,4341$	$\lg \tau_{65\text{mm}} = 0,2945 \dot{\gamma} + 4,1972$	$\lg \tau_{45\text{mm}} = 0,3068 \dot{\gamma} + 4,1108$	$\tau_{80\text{mm}}$ [Pa]	$\tau_{45\text{mm}}$ [Pa]	$\tau_{65\text{mm}}$ [Pa]
100	2.00000	4.9857	4.7862	4.7244	96760	61122	53015
300	2.477121	5.11729	4.926712	4.870781	131005	84471	74264
500	2.69897	5.178476	4.992047	4.938844	150825	98185	86864
800	2.90309	5.234772	5.05216	5.001468	171700	11276	100338
1000	3.00000	5.2615	5.0807	5.0312	182599	120420	107448
3000	3.477121	5.39309	5.221212	5.177581	247223	166422	150515
5000	3.69897	5.454276	5.286547	5.245644	284626	193440	176053

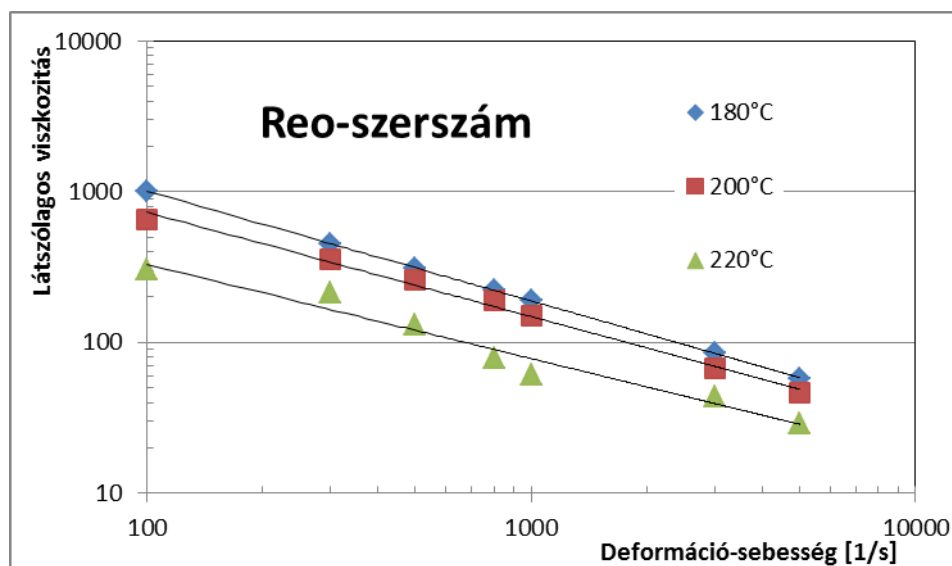
25. táblázat. Bagley-korrekción változó kapilláris hosszúságra ($T_a=T_{sz}=220^\circ\text{C}$)

$\dot{\gamma}$ [1/s]	$\lg \dot{\gamma}$	$\lg \tau_{80\text{mm}} = 0,3305 \dot{\gamma} + 4,1078$	$\lg \tau_{65\text{mm}} = 0,3294 \dot{\gamma} + 4,1653$	$\lg \tau_{45\text{mm}} = 0,3068 \dot{\gamma} + 4,1108$	$\tau_{80\text{mm}}$ [Pa]	$\tau_{45\text{mm}}$ [Pa]	$\tau_{65\text{mm}}$ [Pa]
100	2.00000	4.7688	4.8241	4.7244	58721.89	66696	53015
300	2.477121	4.926489	4.981264	4.870781	84428.4	95777	74264
500	2.69897	4.99981	5.054341	4.938844	99956.17	113328	86864
800	2.90309	5.067271	5.121578	5.001468	116753.9	132305	100338
1000	3.00000	5.0993	5.1535	5.0312	125689.8	142396	107448
3000	3.477121	5.256989	5.310664	5.177581	180712.7	204486	150515
5000	3.69897	5.33031	5.383741	5.245644	213948.7	241958	176053

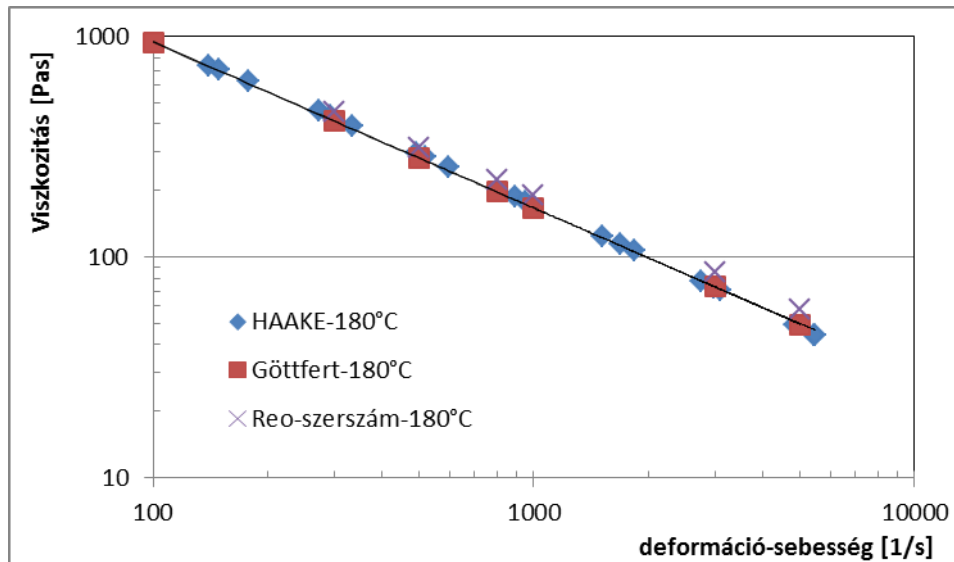
26. táblázat. Nyíróviszkozitás összefoglaló táblázata

$\dot{\gamma}$ [1/s]	$\eta_{180^\circ\text{C}}$ [Pas]	$\eta_{200^\circ\text{C}}$ [Pas]	$\eta_{220^\circ\text{C}}$ [Pas]
100	1150	962	437
300	498	427	215
500	337	293	154
800	235	207	114
1000	199	175	98
3000	86	78	48
5000	58	53	35

A mérőszerszámmal meghatározott viszkozitásgörbék a 68. ábrán, a három különböző módszerrel meghatározott folyásgörbék pedig a 69. ábrán láthatók.



68. ábra. Reológiai szerszámmal meghatározott viszkozitásgörbék



69. ábra. Három különböző módszerrel meghatározott viszkozitásgörbe

4.5.2 A kitöltési folyamat termikus vizsgálata

Az áramlási folyamat közben végbemenő termikus folyamatok jellemzéséhez a 3.3.3. fejezetben ismertetett dimenziómentes számokat használjuk. (57-63 egyenletek). A dimenziómentes számokat a minimális és a maximális térfogatáramra határoztuk meg. A számított eredményeket a 27. és 28. táblázatban foglaltuk össze. A Graetz-szám mindig lényegesen magasabb volt, mint 100, így a számításokhoz használt T^* minden esetben a beállított anyaghőmérséklet volt. A Nahme- és a Brinkman-számok a disszipációs hő, és a keresztirányú hőáramot hasonlítják össze. Ezeknek a számításoknak csak abban az esetben van értelme, ha a szerszámhőmérséklet alacsonyabb, mint az anyaghőmérséklet.

A dimenziómentes számok azt mutatják, hogy ha jelentős a hőmérsékletkülönbség a belépési hőmérséklet és a fal hőmérséklete között, akkor az erős disszipációs melegedés mellett jelentős keresztirányú hőáramlással is számolni kell, ami kis szerszám magasság esetén egy falmenti hidegebb réteg megjelenését is jelentheti, ami jelentősen befolyásolhatja a nyomásmérést.

27. táblázat. Dimenziómentes számok összefoglalása ($T_a=180^\circ\text{C}$)

Szerszám	$T_{\text{szerszám}}$	Térfogatáram	Graetz-szám	Nahme-szám	Brinkman-szám
1. szerszám h=2 mm w=15 mm	30°C	min.	183	25	3
		max.	2198	1353	42
	90°C	min.	183	29	1,23
		max.	2198	681	28,6
2. szerszám h=3 mm w=15 mm	30°C	min.	274	35	1,6
		max.	4946	992	44
	90°C	min.	274	34	2,1
		max.	4946	1388	64,2
3. szerszám h=4 mm w=15 mm	30°C	min.	366	29	1,3
		max.	6595	807	36,6
	90°C	min.	366	29	1,9
		max.	6595	859	55

28. táblázat. Dimenziómentes számok összefoglalása ($T_a=220^\circ\text{C}$)

Szerszám	$T_{\text{szerszám}}$	Térfogatáram	Graetz-szám	Nahme-szám	Brinkman-szám
1. szerszám h=2 mm w=15 mm	30°C	min.	183	26	2
		max.	2198	570	44
	90°C	min.	183	20	1,36
		max.	2198	520	34
2. szerszám h=3 mm w=15 mm	30°C	min.	274	24	1,41
		max.	4946	563	33
	90°C	min.	274	29,2	1,26
		max.	4946	879	38
3. szerszám h=4 mm w=15 mm	30°C	min.	366	23	0,92
		max.	6595	608	24,4
	90°C	min.	366	15	0,7
		max.	6595	700	17

A hőmérséklet és nyomás viszkozitásra gyakorolt hatásának meghatározásához a legkisebb és a legnagyobb térfogatáramokat vettük figyelembe, és a (71) egyenlettel számítottuk a korigált nyomásesést.

A számításokhoz használt anyagjellemzők:

Jelölés	Érték	Mértékegység	Megjegyzés
α_{η}	0,026	1/°C	Hőmérséklet viszkozitásra gyakorolt hatása
β_{η}	0,0168	1/MPa	Nyomás hatása a viszkozitásra
ρ_{ref}	864	kg/m ³	Ömledék sűrűsége referencia hőmérsékleten
α_{ρ}	0,588	1/°C	Sűrűség- hőmérsékleti együttható

Az ömledéksűrűsége adott hőmérséklettel írhatjuk le:

$$\rho_T = \rho_{T_{ref}} \cdot \alpha_{\rho}$$

29. táblázat. Ömledéksűrűség a hőmérséklet függvényében

T _{anyag} [°C]	ρ [kg/m ³]
180	758
200	746
220	634

30. táblázat. A disszipációs hőfejlődés és a nyomás hatása a viszkozitásra

	T _{anyag} [°C]	180	180	220	220
	T _{szerszám} [°C]	30	180	30	220
	Q				
$\Delta p_{valós}$ [MPa]	min	10.67	12.54	11.42	8.53
	max	15.95	28.24	14.9	20.65
$\Delta T_{diszip.}$ [°C]	min	5.4	6.33	5.7	4.31
	max	8	14.27	7.5	10.4
η_{alap} [Pas]	min	267	313.5	285.6	213.3
	max	20	35.3	18.59	25.8
η_{diszip} [Pas]	min	232	265.8	245.8	190.7
	max	16.1	24.35	15.3	19.67
$\eta_{nyomás}$ [Pas]	min	277.6	328.2	297.8	220
	max	21.2	39.14	19.7	27.8
$\Delta p_{korigált}$ [MPa]	min	11.4	13.47	12.23	9.03
	max	17.2	28.1	16	22.04

A disszipációs melegedés és a nyomás viszkozitásra gyakorolt hatását a 30. táblázatban foglaltuk össze. A számítási eredmények szerint a legnagyobb eltérés a legnagyobb hőmérsékletkülönbség esetén következik be, ami maximálisan 15%-os eltérést jelent. Azokban az esetekben, amikor a falhőmérséklet azonos a belépő anyag hőmérsékletével, az eltérés elhanyagolható.

4.5.3 Nyújtási áramban végrehajtott mérések

A méréshez felhasznált kapilláris magassága $h=2$ mm, szélessége $w=15$ mm, teljes hosszúsága 148 mm, az első jeladó és a kilépési pont távolsága pedig 80 mm volt. A 2 és 3 nyomásmérők között alakítottuk ki a 2 mm széles és 2 mm hosszú nyílást, így a 2 és 3 nyomásmérők különbsége adta a nyílásban bekövetkező nyomáscsökkenést (70. ábra). Kiértékelés során Cogswell elméletét használtuk. A nyílás előtti adatokból számítottuk ki a viszkozitást és a hatványtörvény kitevőjét. Ennek felhasználásával határoztuk meg a nyújtási sebességet és nyújtási feszültséget, majd a nyújtási viszkozitást (100-103).

$$\sigma = \frac{\tau}{\operatorname{tg}\varphi} \quad (100)$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{\gamma}}{3} \operatorname{tg}\varphi \quad (101)$$

$$\eta_{ny} = \frac{\sigma}{\dot{\varepsilon}} \quad (102)$$



70. ábra. Nyújtási viszkozitás meghatározásához alkalmazott betét

A primer mérési adatokat a melléklet 64-66. táblázatai tartalmazzák.

A számítás első lépésében meghatároztuk a kapilláris előtti részben ($h=2$ mm; $w=15$ mm) a nyíróáramlás jellemzőit, majd a belépési zónában ébredő nyújtási jellemzőket.

A belépési szög meghatározására, ami $\varphi=37,15^\circ$ -ra adódott, szintén Cogswell elméletét használtuk.

A rés előtt számított eredményeket a 31. táblázatban, a résben számított értékeket pedig a 32. táblázatban foglaltuk össze.

31. táblázat. Nyíróáramlás jellemzői a rés előtt ($T_a=180^\circ\text{C}$; $T_{sz}=90^\circ\text{C}$ $L_{kap}=20$ mm)

$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [Pa]	$\lg \tau$	$\lg \dot{\gamma}$	η	$\lg \eta$
500	736175	5.866981	2.69897	1472.351	3.168011
1000	821078	5.914385	3	821.0783	2.914385
2000	923270	5.965329	3.30103	461.6351	2.664299
3000	996480	5.998469	3.477121	332.16	2.521347
4000	1007078	6.003063	3.60206	251.7696	2.401003

$$\log \dot{\gamma}^* - \log \tau^*: \quad y=0,24794x+4,582$$

32. táblázat. Számított nyújtási jellemzők a résben ($T_a=180^\circ\text{C}$; $T_{sz}=90^\circ\text{C}$ $L_{kap}=2$ mm)

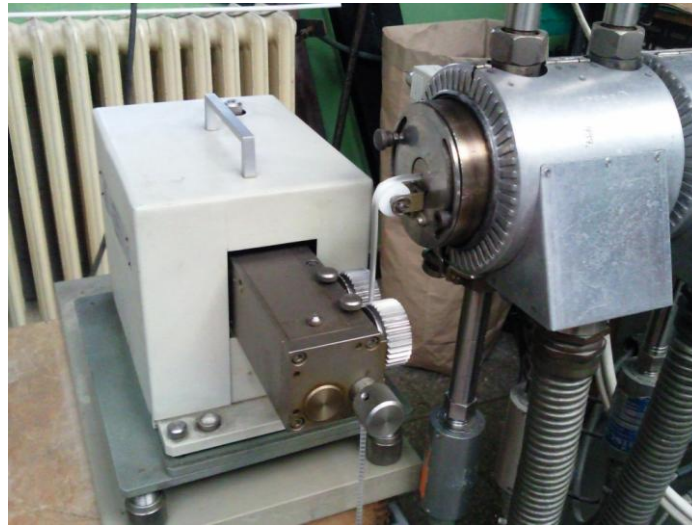
$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [Pa]	η_{nt}	σ [Pa]	ε [1/s]	η_{ny}
3750	4009762	1069	5292137	1420	3725
7500	4348128	579	5738717	2841	2019
15000	4818821	321	6359943	5682	1119
22500	5143273	228	6788160	8523	796
30000	5170508	172	6824105	11365	600

33. táblázat. Számított nyújtási jellemzők összefoglaló táblázata

$T_a=180^\circ\text{C}$ $T_{sz}=90^\circ\text{C}$			$T_a=200^\circ\text{C}$ $T_{sz}=90^\circ\text{C}$			$T_a=220^\circ\text{C}$ $T_{sz}=90^\circ\text{C}$		
$\dot{\varepsilon}$ [1/s]	σ [Pa]	η_e [Pas]	$\dot{\varepsilon}$ [1/s]	σ [Pa]	η_e [Pas]	$\dot{\varepsilon}$ [1/s]	σ [Pa]	η_e [Pas]
1420	5292137	3725	1420	5135384	3614	1420	4699433	3307
2841	5738717	2019	2841	5281674	1858	2841	4842432	1704
5682	6359943	1119	5682	5823023	1024	5682	5400363	950
8523	6788160	796	8523	6039328	708	8523	5809044	681
11365	6824105	600	11365	6119514	538	11365	6149351	541
			14206	6160975	433	14206	6309151	444
			17047	6233729	365	17047	6259921	367

Sajnos összehasonlító mérésre nem volt lehetőség, de irodalmi adatok alapján az eredmények reálisnak tűnnek.

Nyújtóviszkozítás méréseket hajtottunk végre Göttfert Rheotens extruziométer berendezéssel (71. ábra).



71. ábra. Göttfert Rheotens nyújtásviszkozítás-mérő berendezés

A mérési paramétereket a 34. táblázatban foglaltuk össze.

34. táblázat. Nyújtóviszkozítás meghatározásának paraméterei, jellemzői

Paraméter	
Hőmérséklet (T)	180 °C; 190°C; 200°C; 210°C; 220°C
Szerszámnyílás keresztmetszete (A₀)/átmérője	7,065 mm ² (3 mm)
Extrudálás sebessége (v₀)	36 mm/perc
A szerszám és lehúzó távolsága (L)	70 mm
Pillanatnyi lehúzási sebesség (v)	36 mm/perc...504 mm/perc (14 lépcső)
Nyújtási arány (λ)	0...7
Húzáshoz szükséges erő (F)	Mért érték

Kiértékelés során a nyújtási sebességet és a nyújtási feszültséget az alábbi összefüggésekkel határozhatjuk meg (103, 104).

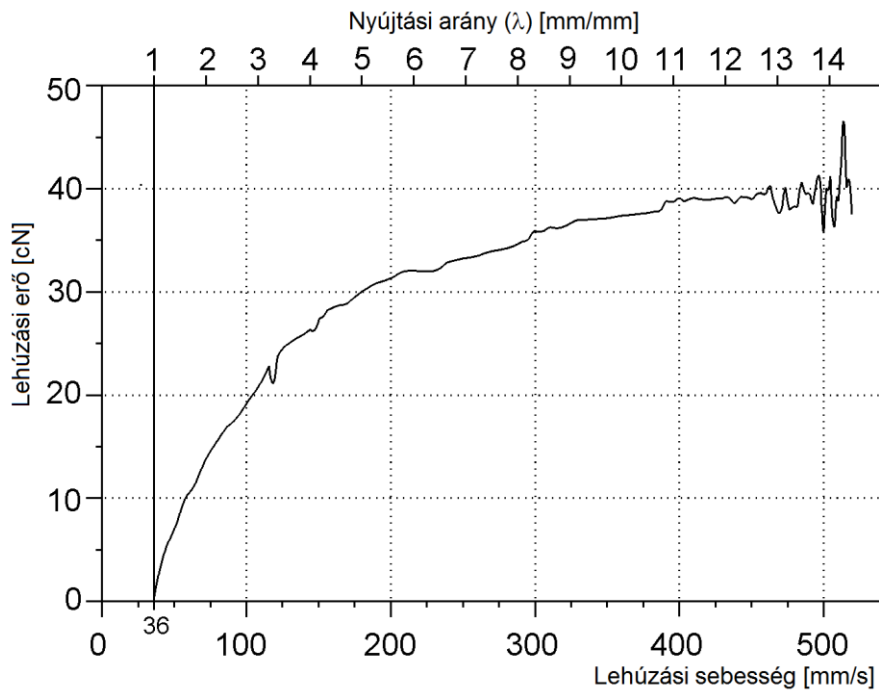
A nyújtási sebesség:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L} \ln \frac{v}{v_0} \quad (103)$$

A húzó feszültség:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0 / \lambda} = \frac{\lambda F}{A_0} \quad (104)$$

A beállítás során mért primer mérési görbe a72. ábrán látható.

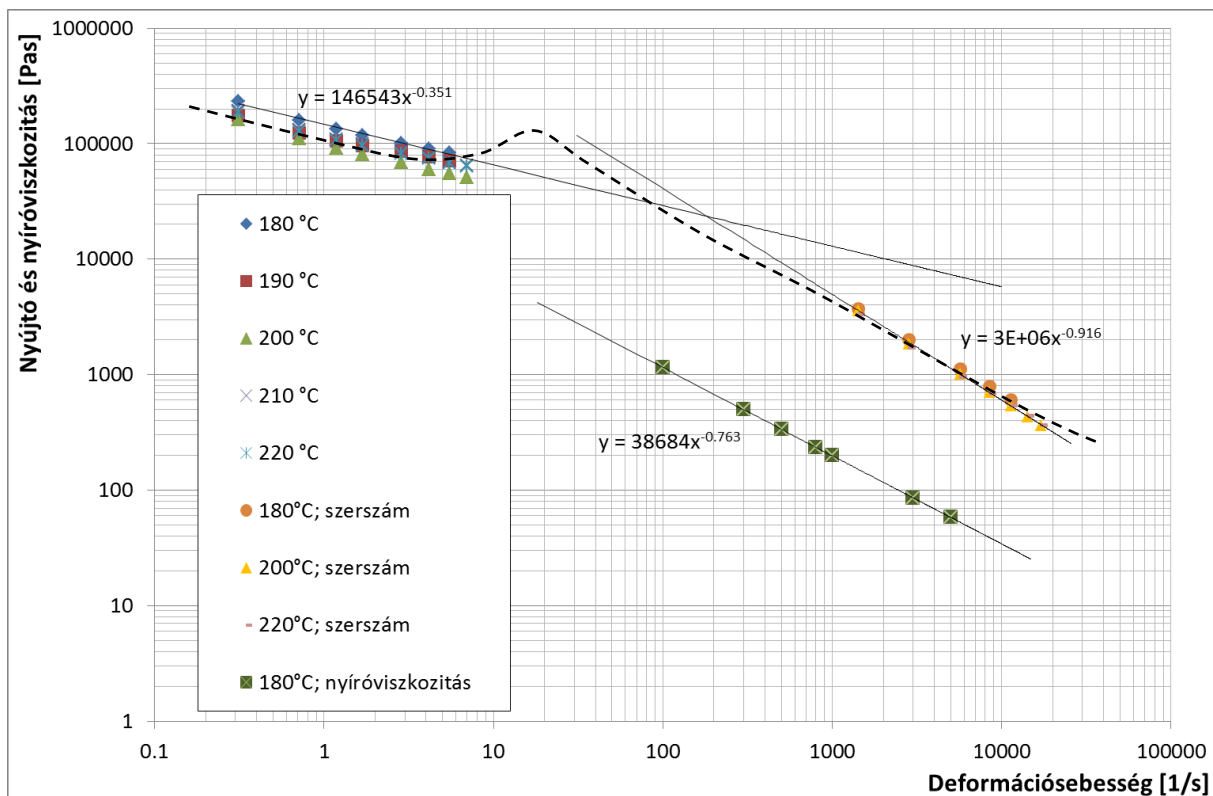


72. ábra. Lehúzási erő a nyújtási sebesség függvényében

A 103-as és 104-es összefüggések segítségével meghatározott nyújtási sebességet és az egyes hőmérsékleteken meghatározott nyújtási feszültséget a 35. táblázatban foglaltuk össze.

35. táblázat. Nyújtási feszültség a nyújtási arány és a hőmérséklet függvényében

λ [mm/mm]	$d\varepsilon/dt$ [1/s]	σ [Pa]				
		180 °C	190 °C	200 °C	210 °C	220 °C
1	0	37353	27190	26369	30431	29356
1,5	0,312	72972	54713	50891	59978	57855
2	0,712	113574	87530	78386	94041	90728
2,5	1,177	156652	123602	107183	127636	125973
3	1,694	200679	161571	136305	167983	162293
4	2,850	288634	245774	195612	243566	235414
5	4,136	374451	319427	249044	317692	307360
6	5,525	457834	396433	304034	389893	377664
7	7,001	0	472215	357183	449922	445067



73. ábra. Nyíró- és nyújtóviszkozítások

A mérési eredmények megfelelnek az irodalomban publikáltaknak [32,93]. Ennek megfelelően a nyújtási viszkozitás a kis deformációsebesség-tartományban kis mértékben csökken a sebesség növekedésével, majd egy maximumon áthaladva erőteljesen csökken, a nyírási viszkozitáshoz hasonlóan. Ez a maximum a 10 1/s deformáció-sebesség környezetében jelentkezik. Természetesen az ömledék hőmérséklete lényegesen befolyásolja a maximum helyét. Sajnos a mérési lehetőségeink nem tették lehetővé ennek a tartománynak a vizsgálatát, azonban a 73. ábrán jól megfigyelhető, hogy a két mérési módszerrel meghatározott értékek jól követik a várt meredekség változást. Szaggatott vonallal jelöltük az elméleti átmenetet a két tartomány között. Meg kell jegyezni, hogy a Göttfert berendezéssel történő mérés esetén a termikus viszonyok nem kontrolláltak, mivel az extrúzió a szabadban történik, így az extrudátum hőmérséklete folyamatosan csökken a mérés során. A hőleadás az ömledék hőmérséklet növekedésével növekszik, amit jól mutat, hogy a 210 °C-on és 220 °C-on mért értékek magasabbak a 200 °C-on mértéknél. Ugyanez nem jelentkezik a szerszámban történő mérésnél. Mindezek alapján megállapítható, hogy az általunk alkalmazott geometria alkalmas a polimer ömledékek nyújtási viszkozitásának meghatározására nagy deformációsebesség-tartományban.

5 Összefoglalás

Sikerült kifejlesztenünk egy mérőrendszert, ami alkalmas műanyag ömledékek folyási jellemzőinek meghatározására, amelyben szabályozni tudjuk az anyaghőmérsékletet, áramlási sebességet, kapilláris geometriát és a szerszám hőmérsékletét. A kapilláris belsejében több ponton tudjuk mérni a belső nyomás értékét, ami tovább növeli a kiértékeléskor használható számítási módszerek számát. Kísérleteinkhez kissűrűségű polietilént használtunk. Három hőmérsékleten határoztuk meg a viszkozitásgörbéket, melyek a szabványos berendezéssel mért értékekkel jó egyezést mutattak. Több beállítás és mérési körülmény között meghatároztuk dimenziómentes számokkal a disszipációs hő és a keresztirányú hőáram viszonyát, és kimutattuk, hogy kis áramlási sebességnél, kis vastagságú és alacsony hőmérsékletű szerszámrés esetében kell számolni csak az anyag hűlésének zavaró hatásával. A disszipációs hőfejlődéssel és melegedéssel minden esetben számolni kell, azonban a hőmérsékletnövekedés és a nyomás együttes hatásának eredményeképpen a valós és a korrigált nyomásesés közötti különbség nem haladja meg az 5%-ot.

5.1 Tézis pontok

1. Olyan műszerezett fröccsöntő szerszámot fejlesztettem ki, amellyel széles deformációsebesség-tartományban lehet izoterm és nemizoterm vizsgálati körülmények között meghatározni a polimer ömledékek folyóképességét.
2. Dimenziómentes mennyiségek segítségével kimutattam, hogy a polimer ömledék folyása a szerszámrésben milyen beállítások és vizsgálati körülmények mellett tekinthető izotermnek, nemizotermnek, illetve adiabatikusnak.
3. Számítási módszert dolgoztam ki a résben mérhető jellemzők reológiai paraméterekre konvertálására. Igazoltam a mérési módszer alkalmasságát és a számolási módszer pontosságát. Az új módszerrel meghatározott eredmények jó közelítéssel megegyeztek a hagyományos berendezésekkel meghatározott értékekkel.
4. A szerszámrés megfelelő geometriai kialakításával meghatároztam a kissűrűségű polietilén nyújtási viszkozitását nagy deformációsebesség-tartományban.

6 Irodalomjegyzék

1. Jehuda Green, Reinhold Wimberger-Fried: *Precision Injection Moulding*, Hanser Gardner Publications Inc., Munich, 2006.
2. I. Clavería , C. Javierre, L. Ponz: *Method for generation of rheological model to characterize non-conventional injection molding by means of spiral mold*, Journal of Materials Processing Technology, **162–163**, 477–483. (2005)
3. S.C Chen, R.I. Tsai, R.D. Chein, T.K. Lin: *Preliminary study of polymer melt rheology behaviour flowing through micro-channels*, International Communications in Heat and Mass Transfer, **32**, 501-510. (2005)
4. Chun-Sheng Chen, Shia-Chung Chen b,c, Wei-Lianq Liaw d, Rean-Der Chien: *Rheological behavior of POM polymer melt flowing through micro-channels*, European Polymer Journal (2008)
5. M.A. Couch*, D.M. Binding: *High pressure capillary rheometry of polymeric fluids*, Polymer **41**, 6323–6334. (2000)
6. A. L. Kelly, T. Gough, P. D. Coates: *High strain rate rhometry of polymer melts*, Proceedings of the Polymer Processing Society 24th Annual Meeting (PPS-24) June 15-19, 2008 Salerno (Italy)
7. Jonathan P. Rothstein, Gareth H. McKinley: *Extensional flow of a polystyrene Boger fluid through a 4:1:4 axisymmetric contraction/expansion*, J. Non-Newtonian Fluid Mech., **86**. 61-88. (1999)
8. S.A. McGlashan, M.E. Mackay: *Comparison of entry flow techniques for measuring elongation flow properties*, J. Non-Newtonian Fluid Mech. **85**, 213-227. (1999)
9. Donald G. Baird: *First normal stress difference measurements for polymer melts at high shear rates in a slit-die using hole and exit pressure data*, J. Non-Newtonian Fluid Mech., **148**, 13–23. (2008)
10. Mats Stading, Leif Bohlin: *Contraction flow measurements of extensional properties*, Annual Transactions of The Nordic Rheology Society, **8/9**, 181-185. (2000./2001)
11. Szücs András: *Nyomásmérés fröccsöntőszerszám formáüregében*, Mechanoplast, Gyula 2005. március 8-10.

12. Szűcs András: *Fröccsöntés technológiai paramétereinek hatása az üregnyomásra*, II. Mechanoplast Országos Doktorandusz Konferencia, 2005. november 12.
13. Szűcs András, Pósa Márk, Szabó Ferenc: *Mérőrendszer üregnyomás méréshez*, XI. FMTÜ, Kolozsvár, 2006. március 24-25 (359-362).
14. Belina Károly, Szűcs András: *Investigation of polymer flow during filling stage*, PPS2006, Pretoria, Konferencia kiadvány CD, 2006. október 9-13.
15. Beina Károly, Szűcs András, Pósa Márk: *Effect of mold surface finish on the properties of polymers*, PPS2006, Pretoria, Konferencia kiadvány CD, 2006. október. 9-13.
16. C.A. Griffiths, S.S. Dimov, E.B. Brousseau, R.T. Hoyle: *The effects of tool surface quality in micro-injection moulding*, Journal of Materials Processing Technology, **189**, 418–427. (2007)
17. Halász László, Zrínyi Miklós: *Bevezetés a Polimerfizikába*, Műszaki Könyvkiadó 1989.
18. J. M. McKelvey: *Polimerek feldolgozása*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1966.
19. John Vlachopoulos, J. R. Wagner: *The SPE Guide on Extrusion Technology and Troubleshooting*, Society of Plastic Engineering, Brookfield, 2001
20. Dr. Belina Károly, Szűcs András: *Investigation of polymer flow during filling stage*, PPS2006, Pretoria, Konferencia kiadvány CD, 2006.
21. Hans Martin Laun: *Pressure dependent viscosity and dissipative heating in capillary rheometry of polymer melts*, Rheol Acta **42**, 295–308. (2003)
22. Hans Martin Laun: *Polymer melt rheology with a slit die*, Rheol Acta **22**, 171–185, (1983)
23. Hans Martin Laun: *Orientation of macromolecules and elastic deformation in polymer melts, Influence of molecular structure on the reptation of molecules*, Progress in Colloid and Polymer Science **75**, 111–139, (1987)
24. Hans Martin Laun: *Rheological and mechanical properties of PaMSAN/ PMMA blends in miscible and phase separated regimes. I. Characterization of constituents, blend preparation, and overview on blend morphology*. Pure and Applied Chemistry **70**, 1547–1566 (1998)
25. Hans Martin Laun: *Pressure dependent viscosity of a PaMSAN melt from capillary rheometry*, Rheol. Acta (2003)

26. T. Osswald, L. Turng, P. Gremann: *Injection molding handbook*, Hanser Gardner Publications Inc, Munich 2008.
27. Hans Martin Laun, Reuther W: *Automated high precision nitrogen gas driven capillary rheometer*. Rheol Acta (2003)
28. T. Osswald, L. Turng, P. Gremann: *Injection molding handbook*, Hanser Gardner Publications Inc, Munich 2008.
29. John Philip Beaumont: *Runner and Gating Design Handbook Tools for Successful Injection Molding*, Hanser Garden Publications Inc, (2004) ISBN 3-446-22672-9
30. Mercedes Fernández, María Eugenia Munoz, Anton Santamaría Seppo Syrjala, Johanna Aho: *Determining the pressure dependency of the viscosity using PVT data: A practical alternative for thermoplastics*, Polymer Testing **28**, 109-113, (2009)
31. A. A. Miller: *Mobilities of polymer liquids at constant temperature and at constant volume*, Polymer **19**, 899-904, (2009)
32. D.M. Binding, M.A. Couch, K. Walters: *The pressure dependence of the shear and elongational properties of polymer melts*, J. Non-Newtonian Fluid Mech., **79**. 137-155. (1998)
33. S. Muke, I. Ivanov, N. Kao, S.N. Bhattacharya: *Extensional rheology of polypropylene melts from the Rheotens test*, J. Non-Newtonian Fluid Mech., **101**, 77–93. (2001)
34. D. M. Binding: *Modelling polymer melt flow in wirecoating process*, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics **64**, 191-206, (1996)
35. Yong Sun, Joseph Dooley: *Numerical and experimental investigation of the elongational viscosity effect in a coat-hanger die*, Journal of Plastic Technology **4**, 1-14. oldal, (2008)
36. J. Greener, R. Wimberger: *Precision Injection Molding*, Hanser Gardner Publications Inc, Munich 2008.
37. John Vlachopoulos, David Strutt: *An Overview of Polymer Processing*, Centre for Advanced Polymer Processing and Design (CAPPA-D) Department of Chemical Engineering McMaster University, Elektronikus jegyzet.
38. F. N. Cogswell: *Polymer Melt Rheology*, Georg Godwin Limited, London 1981.

39. R. B. Bird: *Dinamics of Polymeric Fluids*, John Wiley Sons, New York, (1987)
40. N. E. Kissi, J.-M. Piau, F. Toussaint: *Sharkskin and cracking of polymer melt extrudates*, J. Non-Newtonian Fluid Mech., **68**, 271-290. (1997)
41. G. hay, M. Mackay, S. A. McGlashan, Y. Park: *Comparison of shear and wall slip measurement techniques on a linear low density polyethylen*, J. Non-Newtonian Fluid Mechhatics, **92**, 187-201 (2000)
42. L. Robert, B. Vergnes, Y. Demay: *Flow birefringence study of the stick–slip instability during extrusion of high-density polyethylenes*, J. Non-Newtonian Fluid Mech., **112**, 27–42. (2003)
43. Halász László, Molnár Imre, Mondvai Imre: *A polimerek feldolgozásának reológiai alapjai*, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1978.
44. William Brian Black: *Wall slip and boundary effects in polymer shear flow*, Doktori értekezés, University of Wisconsin, Madison, (2000)
45. P. Kennedy: *Flow Analysis Reference Manual*, Shorturn Books, (1993)
46. *Moldex3D 9.0 User's Manual*, CoreTech Co., Ltd, Taiwan, (2008)
47. Dr. Boza Pál, Pósa Márk: *SURFCAM szoftver által megvalósítható simítási stratégiák vizsgálata és adaptálása szabad térbeli felületek marásához*, a GAMF Közleményei 18, (2002)
48. Augusto Teruo Morita, Mário Shissun Toma, Marco-Aurelio De Paoli: *Low cost capillary rheometer, transfer molding and die-drawing module*, Polymer Testing, **25**, 197–202. (2006)
49. P.F. Bariani, M. Salvador, G. Lucchetta: *Development of a test method for the rheological characterization of polymers under the injection molding process conditions*, Journal of Materials Processing Technology, **191**, 119–122. (2007)
50. J.A. Covas, J. M. No'brega, J. M. Maia: *Rheological measurements along an extruder with an on-line capillary rheometer*, Polymer Testing, **19**, 165–176. (2000)
51. C. Holzer, T. Lucyshyn, W. Friesenbichler, I. Duretek, R. Jegadeesan: *Measurement of pressure dependent viscosity and its influence on injection moulding simulation*, PPS-2009 Europe-Africa Regional Meeting, Polymer Processing Society, Larnaca (Cyprus), 2009. october 18-21

52. A. Özdemir, O. Uluer, A. Güldas: *Flow front advancement of molten thermoplastic materials during filling stage of a mold cavity*, Polymer Testing, **23**, 957–966. (2004)
53. D.E. Dimla, M. Camilotto, F. Miani: *Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools*, Journal of Materials Processing Technology, **164–165**, 1294–1300. (2005)
54. Szűcs András: *Műanyagok folyóképességének meghatározása fröccsöntési folyamat közben*, FMTÜ 2007. Konferencia, Kolozsvár, 2007. március 16.
55. Szűcs András, dr Belina Károly: *Kitöltési folyamat tanulmányozása fröccsöntőszerszám formaiüregében*, Műanyag- és gumiipari évkönyv 2006. 13-15.
56. Dr. Belina Károly, Szűcs András: *Investigation of polymer flow during filling stage*, PPS2006, Pretoria, 2006. október 9-13.
57. Ming-Shyan Huang: *Cavity pressure based grey prediction of the filling-to-packing switchover point for injection molding*, Journal of Materials Processing Technology, **183**, 419–424. (2007)
58. Szűcs András: *Műanyagok folyóképességének meghatározása fröccsöntési folyamat közben*, FMTÜ 2007, Kolozsvár, 185-188, 2007. március 16-17.
59. Szűcs András, Pósa Márk, Szabó Ferenc: *Mérőrendszer üregnyomás méréshez*, XI. FMTÜ, Kolozsvár, 359-362, 2006. március 24-25.
60. Szűcs András, Belina Károly: *Polimerek folyásának tanulmányozása spirál szerszámban*, Műszaki szemle **38**, 364-367. (2007)
61. Szűcs András, Pósa Márk, Belina Károly: *Development of viscosity measuring system for polymers*, PPS-24, Salerno, 2008. június 15-19.
62. Szűcs András, Belina Károly: *Polimerek folyásának tanulmányozása spirál szerszám alkalmazása*, Műanyag- és gumiipari évkönyv **2008**. 13-14. (2008)
63. Szűcs András, Belina Károly: *Investigation of high speed rheology of polymers*, TEAM 2009, Slavovski Brod, December 10-11, 2009.
64. Szűcs András, Belina Károly: *Reológiai jellemzők meghatározása műszerezett fröccsöntő szerszámmal*, Műanyag és Gumi **12**, 476-478, (2009)

65. Szűcs András, Belina Károly: Investigation of high speed rheology of polymers, I. International Scientific and Expert Conference (TEAM 2009), 14-18, Slavonsky Brod 2009.
66. Szűcs András, Belina Károly, Pósa Márk: *LDPE folyási jellemzőinek meghatározása*, AGTEDU 2009, Kecskemét 2009. november 5.
67. Szűcs András, Belina Károly: Reológiai mérőrendszer fejlesztése, A GAMF Közleményei **23**, 31-40, Kecskemét, (2009)
68. Szűcs András: *LDPE folyási jellemzőinek meghatározása műszerezett fröccsöntőszerszámmal*, Vegyésznap 2009. Kecskemét 2009. november 11.
69. Macskási Levente, Halász László, Szirmai Dorottya: *Polietilén Frakcionálása és reológiai vizsgálata*, Budapest (1972)
70. Macskási Levente: Polietilén folyási és nagyrugalmas tulajdonságainak vizsgálata állandósult nyíróáramlásban, Kandidátusi értekezés, BME, Budapest (1989)
71. J. R. Van Wazer, J. W. Lyons, K. Y. Kim, R. E Colwell: *Viscosity and flow measurement*, New York, Interscience, (1963)
72. S. Oka: *Rheology Theory and Application*, Vol. **3**. Chap. 2 (Ed. Eirich, R. F.) New York, Academic Press, (1960)
73. Mózes Gy., Vámos E.: *Reológia és reometria*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, (1985)
74. J. D. Ferry: *Viscoelastic properties of polymers*, New York, Wiley, (1970)
75. Younggon. Son: *Determination of shear viscosity and shear rate from pressure drop and flow rate relationship in rectangular channel*, Polymer **48**, 632-637, (2007)
76. Bagley, E. B. Trans Soc. Rheol. **5**, 355 (1961)
77. Bagley, E. B., Storey, S. H., West, D. C. J. Appl. Polym Sci. **7**, 1661 (1963)
78. C. D. Han., Charles M., Trans Soc Rheol **15**, 147, (1971)
79. E.A. Jensen, J. C. Christiansen: *Measurements of first and second normal stress differences in a polymer melt*, J. Non-Newtonian Fluid Mech., **148**, 41–46. (2008)
80. Herbert W. Mülner, André Wiczorek, Herbert A. Mang, Josef Eberhardsteiner: *Back calculation of the entrance pressure of capillary dies by means of measurements with slit dies*, Polymer Testing, **26**, 426–437. (2007)

81. Dealy J. M: *Misuse of the term pressure in Rheology*, Rheology Bulletin **77**, 10 – 13, 26–27, (2008)
82. Georgios C. Georgiu: *Compressible viscous flow in slits with slip at wall*, Rheology **38**, 639-654, (1994)
83. Pearson J. R. A.: *Mechanics of Polymer Processing*, Elsevier, London, 1985.
84. Halász L.: *Control methods in polymer processing*, Akadémiai Kiadó, 1993.
85. F. N. Cogswell, Plast. Polymer **36**, 109, (1968)
86. F. N. Cogswell, Polym Eng. Sci. **12**, 64-73, (1972)
87. F. N. Cogswell, Trans. Soc. Rheol. **16**, 383-403 (1972)
88. F. N. Cogswell: *Converging flow and stretching flow: A commplimentation*, J. Non-Newtonian Fluid Mech. **4**, 23, (1978)
89. D. M. Binding, J. Non-Newtonian Fluid Mech **27**, 193, (1988)
90. D. M. Binding, J. Non-Newtonian Fluid Mech **27**, 451, (1991)
91. D. M. Binding, K. J. Walters, Non-Newtonian Fluid Mech. **35**, 121, (1990)
92. Evan Mitsoulis, Omar Delgadillo-Velazquez, Savvas G. Hatzikiriakos: *Transient capillary rheometry: Compressibility effects*, J. Non-Newtonian Fluid Mech., **145**, 102–108, (2007)
93. M. Zatloukal, J. Musil: *Determination of uniaxial extensional viscosity for polyolefins by improved entrance pressure drop measurements*, ANTEC 2007 , 1955-1959, (2007)

7 Új tudományos eredményekhez kapcsolódó publikációk

Nyomtatott magyar nyelvű folyóiratt cikk, konferencia kiadvány

1. Szücs András, Belina Károly: Reológiai jellemzők meghatározása műszerezett fröccsöntő szerszámmal, *Műanyag és Gumi* **12.**, 476-478, 2009.
2. Szücs András, Belina Károly, Pósa Márk: *LDPE folyási jellemzőinek meghatározása*, AGTEDU 2009, Kecskemét 2009. november 5.
3. Szücs András, Belina Károly: Reológiai mérőrendszer fejlesztése, *A GAMF Közleményei* **23**, 31-40, Kecskemét, 2009.
4. Szücs András: *Nyomásmérés mérés spirálcsatornás fröccsöntő szerszámban*, FMTÜ 2008. Konferencia, Kolozsvár, külföldi konferencia kiadvány 2008. március 14-15
5. Szücs András, Belina Károly: *Polimerek folyásának tanulmányozása spirál szerszám alkalmazása*, *Műanyag- és gumiipari évkönyv* 13-14. oldal 2008.
6. Szücs András, Belina Károly: *Kitöltési folyamat tanulmányozása fröccsöntőszerszám formaiüregében*, *Műanyag- és gumiipari évkönyv* 2006. 13-15. oldal, 2006.
7. Szücs András: *Műanyagok folyóképességének meghatározása fröccsöntési folyamat közben*, FMTÜ 2007. Konferencia, Kolozsvár, külföldi konferencia kiadvány 185-188. oldal, 2007. március 16-17.
8. Szücs András, Pósa Márk, Szabó Ferenc: *Mérőrendszer üregnyomás méréshez*, XI. FMTÜ, Kolozsvár, 2006. március 24-25 (359-362).
9. Szücs András, Pósa Márk: *Fröccsöntési paraméterek hatása az üregnyomásra*, XI. FMTÜ, Kolozsvár, 2006. március 24-25 (355-358).

Külföldi írott publikáció

1. Szücs András, Pósa Márk, Belina Károly: *Development of viscosity measuring system for polymers*, PPS-24, Salerno (Olaszország), 2008. június 15-19. (konferencia kiadvány CD)
2. Belina Károly, Szücs András: *Investigation of polymer flow during filling stage*, PPS2006, Pretoria, Konferencia kiadvány CD, 2006. október 9-13.
3. Szücs András: *Study of non-isothermal mould filling*, International Doctoral Seminar, Konferencia kiadvány 467-474, 2010.

Magyar nyelvű szakmai előadások

1. Szücs András: *LDPE folyási jellemzőinek meghatározása műszerezett fröccsöntőszerszámmal*, Vegyésznap 2009. Kecskemét 2009. november 11.
2. Szücs András, Belina Károly, Pósa Márk: *LDPE folyási jellemzőinek meghatározása*, AGTEDU 2009, Kecskemét 2009. november 5.
3. Szücs András, Belina Károly: *Szimulációs programok alkalmazása műanyagipari kutatás-fejlesztésben*, VIII. eCon végeeselemes felhasználói konferencia, Budapest, 2009. április 23.
4. Szücs András, Belina Károly: *Reológiai mérésre alkalmas fröccsöntő szerszám tervezése*, Mechanoplast 2009, Balatonaliga, 2009. március 18.
5. Szücs András: *Nyomáskereső mérés spirálcatornás fröccsöntő szerszámban*, FMTÜ 2008. Konferencia (magyar nyelvű előadás) 2008. március 14-15
6. Szücs András: *Műanyagok folyóképességének meghatározása fröccsöntési folyamat közben*, FMTÜ 2007. Konferencia, Kolozsvár. Szakmai előadás, 2007. március 16.
7. Szücs András: *Műanyagok folyóképességének meghatározása fröccsöntési folyamat közben*, FMTÜ 2007. Konferencia, Kolozsvár. Szakmai előadás
8. Szücs András: *Műanyag ömledékek folyásának meghatározása a szerszámüregben*, Vegyésznap 2006, Kecskemét, 2006. november 9.
9. Szücs András, Belina Károly, Pósa Márk: *Műanyagömledékek áramlásának vizsgálata*, AGTEDU 2006, Kecskemét, 2006. november 9.
10. Szücs András, Pósa Márk, Belina Károly: *Kitöltési folyamat tanulmányozása fröccsöntő szerszám formaiüregében*, GAMF Szakmai nap, Kecskemét, 2006 április 13.
11. Szücs András, Pósa Márk, Szabó Ferenc: *Mérőrendszer üregnyomás méréshez*, XI. FMTÜ, Kolozsvár, 2006. március 24-25.
12. Szücs András, Pósa Márk: *Fröccsöntési paraméterek hatása az üregnyomásra*, XI. FMTÜ, Kolozsvár, 2006. március 24-25.
13. Szücs András: *Fröccsöntés technológiai paramétereinek hatása az üregnyomásra*, II. Mechanoplast Országos Doktorandusz Konferencia, 2005. november 12.
14. Szücs András, dr Belina Károly, Pósa Márk: *Nyomásmérés fröccsöntőszerszám formüregében*, Magyar Tudomány Napja, Kecskemét 2005. november 10
15. Szücs András: *Nyomásmérés fröccsöntőszerszám formaiüregében*, Mechanoplast, Gyula 2005. március 8-10.

Angol nyelvű szakmai előadások

1. Szűcs András: *Study of non-isothermal mould filling*, International Doctoral Seminar, Smolenice, 2010. május 17.
2. Szűcs András, Belina Károly: *Investigation of high speed rheology of polymers*, I. International Scientific and Expert Conference (TEAM 2009), 14-18., Slavonsky Brod 2009.
3. Szűcs András: *Development of viscosity measuring system for polymers*, PPS-24, Salerno Olaszország, 2008. június 15-19. (poszter előadás)
4. Szűcs András, dr Boza Pál, dr Belina Károly, Pósa Márk: *Examination of the effect of machining technology on the surface of injection moulding parts*, Inter-Ing 2005, Marosvásárhely, 2005 november 10-11.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni mindazoknak, akik segítettek a dolgozatom elkészítését.

Mindenekelőtt Dr. Belina Károlynak, hogy szakmai- illetve tudományos vezetőként segítette munkámat doktori tanulmányai alatt, és azt megelőzően egyaránt. Köszönettel tartozom konzulenseimnek, tanárainknak, munkatársaimnak a kutatómunkám alatt nyújtott segítségeikért. Szeretném továbbá megköszönni az összes hallgatónak, aki szakterületemnek, illetve TDK munkájának az én kutatási területemet választotta.

Végül, de nem utolsósorban, hálával tartozom családomnak támogatásukért, hogy hosszú éveken át mindent megtettek, hogy ez a dolgozat elkészülhessen.

8 Mellékletek

8.1 Mérési adatok

36. táblázat. Mérőkapillárisok (szerszámok) adatai

Kapilláris száma	1.	2.	3.	20.	21.	22.	23
Mélység (h) [mm]	2	3	4	2	2	2	2
Áramlási hossz az első jeladótól számítva (l) [mm]	80	80	80	45	65	80	2
Rés szélesség (w) [mm]	15	15	15	15	15	15	15

8.1.1 Változó kapilláris magassággal végzett mérések eredményei

37. táblázat. Primer mérési eredmények (1. kapilláris; h=2 mm, W =15 mm, L= 80 mm)

$$T_a=180^{\circ}\text{C}, T_{sz}=30^{\circ}\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5,00	300,0	192,9	101,2	46,1
10,00	307,6	197,7	103,5	48,5
20,00	327,7	211,9	110,5	51,9
30,00	347,3	225,6	117,3	56,9
40,00	355,8	232,2	121,1	58,8
50,00	353,6	231,4	120,8	58,5
60,00	349,4	228,9	119,8	58,3

38. táblázat. Primer mérési eredmények (2. kapilláris; h= 3 mm, W = 15 mm L= 80 mm)

$$T_a=180^{\circ}\text{C}, T_{sz}=30^{\circ}\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	147,9	90,8	48,0	18,8
10	145,6	89,0	46,6	19,0
20	175,0	108,3	57,7	24,3
30	187,8	116,7	62,3	26,4
40	198,7	124,1	66,5	28,2
50	208,6	130,7	70,0	30,3
60	216,2	136,0	72,9	31,3
70	222,0	139,5	74,8	32,5
80	228,3	144,1	76,9	33,3
90	232,7	147,4	78,7	34,0

39. táblázat. Primer mérési eredmények (3. kapilláris; $h=4$ mm, $W=15$ mm, $L=80$ mm)

$$T_a=180^\circ\text{C}, T_{sz}=30^\circ\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	90,6	55,5	30,7	10,9
10	89,8	54,7	29,9	12,0
20	101,1	62,5	35,1	14,8
30	111,6	69,7	39,4	17,0
40	119,3	74,4	42,6	18,5
50	126,7	79,1	45,0	19,6
60	132,1	82,9	46,8	20,7
70	136,5	86,5	49,1	21,6
80	140,5	88,7	50,3	22,2
90	144,8	91,4	51,4	22,9

40. táblázat. Primer mérési eredmények (1. kapilláris; $h=2$ mm, $W=15$ mm, $L=80$ mm)

$$T_a=200^\circ\text{C}, T_{sz}=30^\circ\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	185.2	119.2	63.6	28.8
10	280.7	180.0	95.2	43.1
20	201.2	129.4	68.2	31.6
30	316.4	204.8	107.9	50.8
40	328.5	213.6	111.8	52.4
50	224.0	146.4	76.4	36.8
60	112.2	73.1	38.5	18.2
70	333.7	218.2	115.2	54.7

41. táblázat. Primer mérési eredmények (2. kapilláris; $h=3$ mm, $W =15$ mm, $L= 80$ mm)

$$T_a=200^{\circ}\text{C}, T_{sz}=30^{\circ}\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	146.3	89.4	46.6	17.4
10	139.9	85.1	44.2	17.7
20	155.0	95.2	50.6	20.8
30	167.9	104.1	56.0	23.5
40	178.6	110.8	59.9	25.2
50	187.9	117.3	63.7	26.9
60	195.6	122.2	66.2	28.4
70	201.3	126.1	68.5	29.1
80	207.7	130.4	70.8	30.2
90	211.7	132.7	71.7	30.8

42. táblázat. Primer mérési eredmények (3. kapilláris; $h=4$ mm, $W =15$ mm, $L= 80$ mm)

$$T_a=200^{\circ}\text{C}, T_{sz}=30^{\circ}\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	78.8	48.4	26.5	9.2
10	80.2	49.0	26.7	9.9
20	88.8	55.1	31.2	12.6
30	97.4	60.8	34.8	14.3
40	105.6	66.2	38.0	16.0
50	111.4	70.5	40.2	17.0
60	116.2	73.9	42.4	18.1
70	121.7	76.7	44.2	19.2
80	125.4	79.6	45.9	19.6
90	129.4	82.6	46.8	20.2

43. táblázat. Primer mérési eredmények (1. kapilláris; $h=2$ mm, $W = 15$ mm, $L= 80$ mm)

$$T_a=220^\circ\text{C}, T_{sz}=30^\circ\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	260.5	166.3	89.7	39.9
10	273.0	173.4	92.2	41.8
20	303.2	194.9	102.9	46.6
30	313.2	201.8	106.6	48.8
40	319.7	206.9	109.3	51.2
50	320.0	207.9	109.6	51.3
60	319.6	207.3	109.2	51.0
70	318.3	207.1	109.6	50.1
80	260.5	166.3	89.7	39.9
90	273.0	173.4	92.2	41.8

44. táblázat. Primer mérési eredmények (2. kapilláris; $h=3$ mm, $W = 15$ mm, $L= 80$ mm)

$$T_a=220^\circ\text{C}, T_{sz}=30^\circ\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	127.4	78.3	39.8	14.6
10	124.3	75.9	38.6	15.2
20	136.8	84.3	43.9	17.8
30	149.8	92.7	48.9	20.1
40	158.7	98.3	52.1	21.3
50	167.9	104.7	56.1	22.6
60	171.8	106.7	57.6	23.7
70	175.2	109.6	58.7	24.5
80	172.5	107.6	57.9	24.2
90	170.3	106.2	57.6	24.1

45. táblázat. Primer mérési eredmények (3. kapilláris; $h=4$ mm, $W = 15$ mm, $L= 80$ mm)

$$T_a=180^\circ\text{C}, T_{sz}=30^\circ\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	74.4	45.1	24.6	8.5
10	72.2	43.5	23.7	9.1
20	79.6	48.7	27.7	11.8
30	85.9	53.1	30.5	13.2
40	61.6	38.2	22.1	9.4
50	98.4	61.6	36.0	16.0
60	103.8	65.1	37.9	16.8
70	107.2	67.1	38.8	17.3
80	111.5	69.9	40.6	18.2
90	115.0	71.8	41.7	18.7

46. táblázat. Primer mérési eredmények (1. kapilláris; $h=2$ mm, $W = 15$ mm, $L= 80$ mm)

$$T_a=180^\circ\text{C}, T_{sz}=90^\circ\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	173.8	119.6	65.4	28.9
10	188.3	130.3	70.8	32.5
20	104.0	72.1	38.8	19.1
30	222.4	155.0	83.7	42.1
40	229.2	160.2	86.2	43.0
50	350.4	245.1	131.7	67.7
60	345.4	241.4	129.9	65.0

47. táblázat. Primer mérési eredmények (2. kapilláris; $h=3$ mm, $W =15$ mm, $L= 80$ mm)

$$T_a=180^{\circ}\text{C}, T_{sz}=90^{\circ}\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	136.8	90.8	50.8	20.6
10	151.4	100.9	56.3	23.4
20	173.9	116.7	65.0	28.4
30	189.1	126.9	70.4	31.0
40	200.1	135.4	75.1	34.0
50	209.3	141.8	78.4	35.2
60	217.7	147.7	81.9	37.0
70	224.4	153.0	84.3	38.7
80	228.9	156.0	86.1	39.9
90	234.4	159.9	88.0	41.1

48. táblázat. Primer mérési eredmények (3. kapilláris; $h=4$ mm, $W =15$ mm, $L= 80$ mm)

$$T_a=180^{\circ}\text{C}, T_{sz}=90^{\circ}\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	88.7	57.3	32.0	13.3
10	90.9	59.3	32.9	14.2
20	103.4	68.5	38.5	16.9
30	113.2	75.2	42.1	18.5
40	121.3	80.8	45.3	20.0
50	128.2	85.9	48.6	21.2
60	134.7	90.6	51.3	22.3
70	140.6	95.4	54.1	23.8
80	143.9	97.4	55.2	24.0
90	148.6	101.1	56.5	25.3

49. táblázat. Primer mérési eredmények (3. kapilláris; $h=4$ mm, $W = 15$ mm, $L= 80$ mm)

$T_a=200^\circ\text{C}$, $T_{sz}=90^\circ\text{C}$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	170.0	116.3	64.2	30.3
10	175.9	120.4	65.5	31.0
20	194.3	133.5	72.4	35.0
30	103.8	71.9	38.7	19.3
40	107.9	74.7	40.3	20.5
50	334.8	231.8	124.6	63.5
60	227.9	158.9	85.6	43.7
70	225.2	156.7	84.6	42.9
80	170.0	116.3	64.2	30.3

50. táblázat. Primer mérési eredmények (3. kapilláris; $h=4$ mm, $W = 15$ mm, $L= 80$ mm)

$T_a=200^\circ\text{C}$, $T_{sz}=90^\circ\text{C}$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	125.3	82.2	45.9	17.7
10	135.1	88.7	49.1	19.6
20	154.9	102.7	56.8	23.3
30	170.6	113.8	62.8	26.4
40	181.8	122.2	68.0	28.6
50	190.5	127.7	70.9	30.4
60	197.7	133.0	73.3	31.7
70	205.2	138.6	76.0	33.5
80	211.2	142.5	78.6	34.5
90	215.6	146.1	80.1	35.7

51. táblázat. Primer mérési eredmények (3. kapilláris; $h=4$ mm, $W = 15$ mm, $L= 80$ mm)

$T_a=200^\circ\text{C}$, $T_{sz}=90^\circ\text{C}$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	77.3	50.4	27.7	10.8
10	80.4	52.1	28.7	11.9
20	91.3	60.0	34.0	14.3
30	101.3	66.9	38.2	16.5
40	108.3	71.8	41.3	17.7
50	116.0	78.3	44.4	19.0
60	120.2	80.8	46.1	19.8
70	123.9	83.4	47.9	20.8
80	128.0	86.2	49.5	21.2
90	132.9	89.9	51.9	22.3

52. táblázat. Primer mérési eredmények (1. kapilláris; $h=2$ mm, $W = 15$ mm, $L= 80$ mm)

$T_a=220^\circ\text{C}$, $T_{sz}=90^\circ\text{C}$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	150.9	102.6	55.3	26.3
10	0.0	0.0	0.0	0.0
20	181.2	122.0	65.3	32.5
30	193.3	130.2	69.4	34.3
40	100.5	68.2	36.4	18.6
50	208.8	142.9	76.0	38.8
60	107.3	73.2	39.1	19.7
70	323.7	222.7	119.0	60.5
80	215.9	148.5	79.6	40.0
90	215.4	148.0	79.0	41.0

53. táblázat. Primer mérési eredmények (2. kapilláris; $h=3$ mm, $W=15$ mm, $L=80$ mm)

$T_a=220^\circ\text{C}$, $T_{sz}=90^\circ\text{C}$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	114.8	74.7	40.8	15.4
10	121.9	79.3	43.2	16.8
20	139.2	90.9	49.8	20.2
30	152.3	100.5	55.2	22.4
40	163.8	108.0	59.9	24.6
50	174.5	116.1	63.8	26.5
60	182.8	122.5	67.1	28.2
70	188.8	126.5	69.5	29.1
80	193.4	129.5	70.8	30.0
90	196.7	131.9	72.2	30.4

54. táblázat. Primer mérési eredmények (3. kapilláris; $h=4$ mm, $W=15$ mm, $L=80$ mm)

$T_a=220^\circ\text{C}$, $T_{sz}=90^\circ\text{C}$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	46.3	30.2	16.0	6.4
10	72.0	46.6	25.2	10.6
20	81.2	53.0	29.8	13.0
30	88.2	57.7	32.6	14.4
40	95.5	63.0	36.0	15.9
50	100.8	66.7	38.2	16.7
60	106.8	71.1	41.0	18.1
70	111.4	73.8	42.0	18.3
80	115.0	76.0	43.1	19.2
90	119.6	79.7	45.2	19.8

8.1.2 Nyíróviszkozítás számítása a különböző hosszúságú szerszámokra

55. táblázat. Primer mérési eredmények (22. kapilláris; $h=2$ mm, $W=15$ mm, $L=45$ mm)

$$T_a=180^\circ\text{C}, T_{sz}=180^\circ\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	92.4	39.7	10.2	1.2
10	119.3	52.5	14.1	2.0
20	150.2	68.3	19.5	2.6
30	163.6	74.9	21.6	3.4
40	177.3	82.0	24.1	3.5
50	185.1	86.2	25.1	3.9
60	197.6	92.3	27.6	4.4
70	204.8	95.8	29.3	4.6

56. táblázat. Primer mérési eredmények (21. kapilláris; $h=2$ mm, $W=15$ mm, $L=65$ mm)

$$T_a=180^\circ\text{C}, T_{sz}=180^\circ\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	132.1	68.2	29.4	7.7
10	154.5	79.6	33.5	8.6
20	186.1	98.1	41.8	10.2
30	207.7	111.9	47.6	12.1
40	219.3	119.2	50.3	12.2
50	239.7	132.8	57.3	14.2
60	251.0	139.6	60.7	15.0

57. táblázat. Primer mérési eredmények (20. kapilláris; $h=2$ mm, $W = 15$ mm, $L= 80$ mm)

$$T_a=180^{\circ}\text{C}, T_{sz}=180^{\circ}\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	149.0	88.9	44.7	29.9
10	183.2	110.4	55.5	36.8
20	222.5	136.1	69.1	45.8
30	241.9	149.6	76.3	49.8
40	264.9	165.1	84.8	54.8
50	285.6	178.6	92.8	59.4
60	290.7	181.9	95.0	60.8

58. táblázat. Primer mérési eredmények (22. kapilláris; $h=2$ mm, $W = 15$ mm, $L= 45$ mm)

$$T_a=200^{\circ}\text{C}, T_{sz}=200^{\circ}\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	79.1	34.1	8.3	1.6
10	103.1	46.4	12.1	1.8
20	131.0	58.9	15.8	2.2
30	148.1	68.7	18.9	2.7
40	157.8	73.3	20.4	3.2
50	171.0	84.0	23.8	3.1
60	178.4	86.9	24.5	3.6
70	185.6	91.1	26.2	3.8
80	194.3	95.8	28.4	4.3
90	197.6	96.8	29.4	4.2

59. táblázat. Primer mérési eredmények (21. kapilláris; $h=2$ mm, $W =15$ mm, $L= 65$ mm)

$T_a=200^\circ\text{C}$, $T_{sz}=200^\circ\text{C}$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	118.0	59.7	25.6	6.0
10	138.6	70.5	29.6	6.9
20	170.1	87.3	36.9	9.0
30	192.3	100.9	43.3	10.5
40	206.7		47.0	11.8
50	220.1	117.4	50.6	12.7
60	231.7	123.9	53.9	13.9
70	244.7	131.6	58.0	14.8
80	243.4	130.9	58.1	14.2

60. táblázat. Primer mérési eredmények (20. kapilláris; $h=2$ mm, $W =15$ mm, $L= 80$ mm)

$T_a=200^\circ\text{C}$, $T_{sz}=200^\circ\text{C}$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	143.7	80.7	42.3	28.7
10	170.0	97.3	50.6	33.6
20	205.3	118.6	61.9	40.9
30	227.2	133.4	70.4	46.0
40	237.5	140.5	73.7	47.9
50	255.0	153.4	80.5	51.9
60	262.6	159.1	83.1	52.9
70	274.1	167.2	87.3	55.3
80	280.0	172.5	90.8	56.8

61. táblázat. Primer mérési eredmények (22. kapilláris; $h=2$ mm, $W=15$ mm, $L=45$ mm)

$$T_a=220^\circ\text{C}, T_{sz}=220^\circ\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	69.3	32.1	7.7	1.2
10	87.4	40.8	10.1	1.6
20	114.2	54.4	13.7	2.3
30	135.4	65.9	17.5	2.1
40	145.5	71.4	19.0	2.9
50	156.9	78.3	20.9	2.7
60	163.1	82.4	22.6	3.6
70	170.5	86.3	24.0	3.8
80	180.7	92.8	26.3	3.5
90	186.9	95.2	27.8	3.9

62. táblázat. Primer mérési eredmények (21. kapilláris; $h=2$ mm, $W=15$ mm, $L=65$ mm)

$$T_a=220^\circ\text{C}, T_{sz}=220^\circ\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	95.0	52.3		7.9
10	125.4	71.7		10.5
20	164.5	96.2		14.8
30	181.7	106.3		17.4
40	194.3	113.6		18.4
50	213.3	126.1		20.0
60	229.5	137.8		20.6
70	237.1	142.5		22.2
80	243.6	146.4		22.2
90	244.9	146.6		22.5

63. táblázat. Primer mérési eredmények (20. kapilláris; $h=2$ mm, $W=15$ mm, $L=80$ mm)

$$T_a=220^\circ\text{C}, T_{sz}=220^\circ\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	106.7	64.4	31.6	20.7
10	133.9	82.3	39.8	27.0
20	173.0	108.1	53.2	34.9
30	196.5	123.3	60.9	39.5
40	213.8	135.1	67.3	42.8
50	232.5	148.5	75.5	47.3
60	242.6	155.5	79.1	49.2
70	255.8	165.7	84.5	52.0
80	265.2	171.8	88.6	54.4
90	270.4	175.5	91.0	55.3

8.1.3 Nyújtási áramban végzett mérések

64. táblázat. Primer mérési eredmények (23. kapilláris; $h=2$ mm, $W=15$ mm, $L=2$ mm)

$$T_a=180^\circ\text{C}, T_{sz}=90^\circ\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	316.5	169.3	89.1	43.8
10	347.7	183.5	96.5	48.0
20	389.1	204.5	108.1	55.1
30	418.1	218.8	115.9	59.8
40	421.3	219.9	116.5	60.3

65. táblázat. Primer mérési eredmények (23. kapilláris; $h=2$ mm, $W=15$ mm, $L=2$ mm)

$$T_a=200^\circ\text{C}, T_{sz}=90^\circ\text{C}$$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	307.9	164.4	86.7	42.5
10	323.1	169.2	89.2	43.3
20	361.2	186.7	98.6	48.5
30	376.2	193.1	101.7	50.5
40	380.4	196.3	103.7	51.6
50	385.3	197.2	103.9	51.7
60	392.2	200.2	105.9	52.4
70	407.4	206.9	109.2	55.5

66. táblázat. Primer mérési eredmények (23. kapilláris; $h=2$ mm, $W=15$ mm, $L=2$ mm)

$T_a=220^\circ\text{C}$, $T_{sz}=90^\circ\text{C}$

Q [cm ³ /s]	P ₁ [bar]	P ₂ [bar]	P ₃ [bar]	P ₄ [bar]
5	289.7	150.9	79.7	39.7
10	303.2	154.9	81.5	39.8
20	340.7	172.2	90.4	44.7
30	368.9	185.4	97.4	48.7
40	389.4	196.8	103.6	52.3
50	405.3	202.8	107.2	54.3
60	403.0	201.5	106.6	53.9
70	400.4	199.8	105.5	53.3

67. táblázat. Mérési adatbázis szerkezete

