	B1	Változat: **1**
		Kiadva: **2007. április 2.**

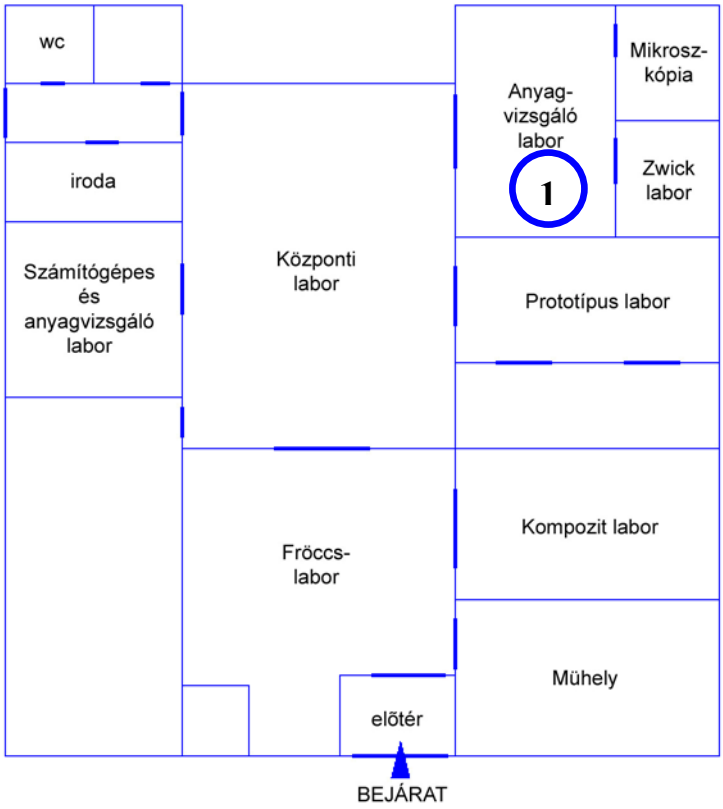
BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

MFI mérés

HŐRE LÁGYULÓ MŰANYAGOK FOLYÓKÉPESSÉGÉNEK VIZSGÁLATA

A JEGYZET ÉRVÉNYESSÉGÉT A TANSZÉKI WEB OLDALON KELL ELLENŐRIZNI!
WWW.PT.BME.HU

A LABORGYAKORLAT HELYSZÍNE



TARTALOMJEGYZÉK

1. A GYAKORLAT CÉLJA 3

2. ELMÉLETI HÁTTÉR 3

2.1. ALAPFOGALMAK, NEWTON VISZKOZITÁSI TÖRVÉNYE 3

2.2. A VALÓS POLIMER ÖMLEDÉKEK VISELKEDÉSE 10

2.3. A FOLYÓKÉPESSÉG, A FOLYÁSI MUTATÓSZÁM ÉS SZABVÁNYOS MEGHATÁROZÁSA 13

2.4. AZ MFI MÉRÉS KIÉRTÉKELKÉSE 15

3. A MÉRÉS LEÍRÁSA, ELVÉGZENDŐ FELADATOK 18

4. A MÉRÉS SORÁN HASZNÁLT GÉPEK, BERENDEZÉSEK 19

5. A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ FONTOSABB SZAVAK ANGOLUL, NÉMETÜL 20

6. AJÁNLOTT IRODALOM 20

MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV 21

1. A gyakorlat célja

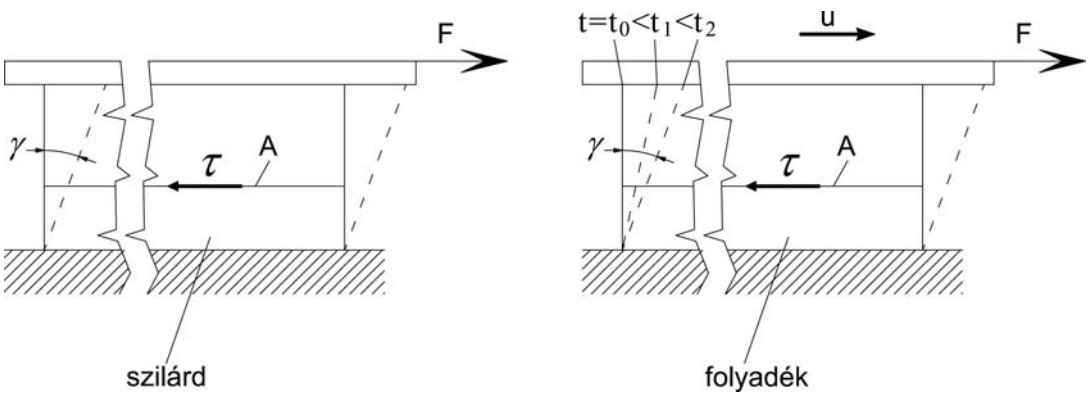
A gyakorlat célja: a hőre lágyuló polimer ömledékek folyási tulajdonságainak, reológiai viselkedésének megismerése. A polimer feldolgozóiparban elterjedt, szabványos folyási mutatószám (MFI, MFR) meghatározása, az MFI mérő berendezés üzemeltetésének megismerése. Az MFI mérő készülék reológiai mérések céljára való felhasználhatóságának bemutatása hőre lágyuló polimer viszkozitásának meghatározásával. A vizsgált polimer folyásgörbéjének kimérése, megszerkesztése.

2. Elméleti háttér

A hőre lágyuló polimerek legtöbb feldolgozási technológiájának van olyan, az alakadást megelőző fázisa, amikor az anyag folyékony halmazállapotú. Ez teszi lehetővé, hogy az alakadás viszonylag kis erők hatására is megfelelő módon végbemenjen. Az ömledékek jellemzőinek, viselkedésének és az ezzel foglalkozó tudomány, az ömledékreológia alapjainak ismerete a feldolgozás szempontjából nélkülözhetetlen. A polimer ömledékek viselkedésének, tulajdonságainak modellezése és mérése alapvetően szükséges a műanyagok feldolgozásához, a polimer termékek előállításához.

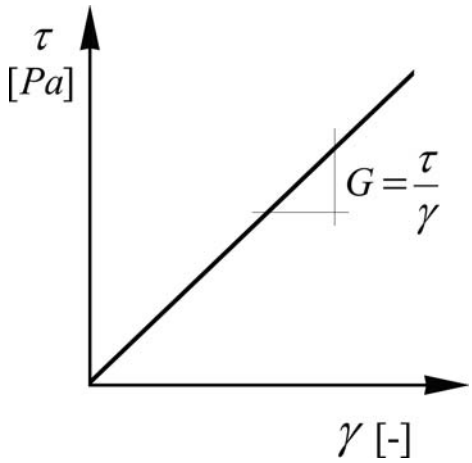
2.1. Alapfogalmak, Newton viszkozitási törvénye

Mi különbözteti meg a folyadékokat a szilárd testektől? Az 1. ábra baloldalán két síklap közé helyezett lapos szilárd testet látunk, melyet alul és felül a lapokhoz ragasztottunk. Jobb oldalon a két párhuzamos lap között folyadékréteg van. A szilárd test és a folyadékréteg lappal párhuzamos keresztmetszete A [m^2] nagyságú.



1. ábra Szilárd test és folyadékréteg deformációja

Az alsó lap rögzített, a felső önmagával párhuzamosan elmozdítható. Ha a lappal párhuzamos irányú F [N] erővel hatunk a felső lapra, akkor a szilárd testben keletkező τ=F/A [Pa] csúsztatófeszültség (a felülettel párhuzamos, egységnyi felületre ható erő) hatására a szilárd test deformálódik. A deformációra jellemző γ szög egy határig arányos a τ [Pa] csúsztatófeszültséggel (**Hooke-törvény**, 2. ábra). Tehát a deformáció nagysága arányos a szilárd testben ébredő csúsztatófeszültséggel, az arányossági tényező a G nyíró rugalmassági modulus.

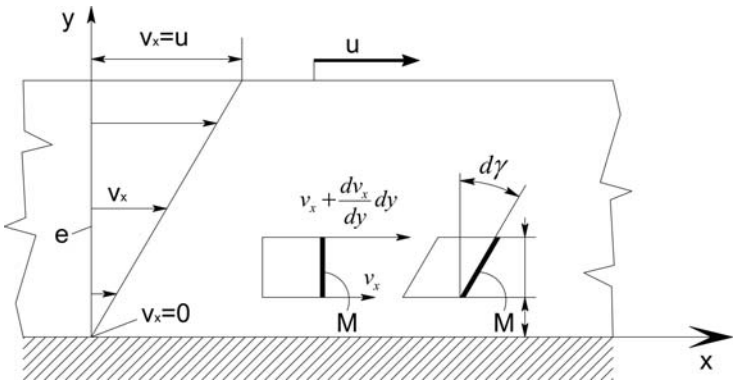


2. ábra A Hooke modell feszültség-deformáció kapcsolata

Ha folyadék van a lapok között, az F erő hatására a felső lap **u** sebességű mozgásba jön, a folyadék időben folyamatosan deformálódik. Ezért a τ csúsztatófeszültség függvényében a deformáció helyett a deformáció sebességét (dγ/dt) vizsgálják.

Az alábbiakban a Newton modell alapján mutatjuk be a folyadékok viselkedésének alapjait. A reális folyadékok viselkedésének leírására is használatos Newton modell az ömledékreológia alapmodellje.

Newtoni folyadékok esetében a két síklap között lévő folyadékréteg sebességmegoszlása lineáris (3. ábra). Az álló laphoz legközelebb lévő folyadékrészek sebessége v_x=0, míg a felső lap közvetlen közelében a sebesség egyenlő a felső lap u sebességével. Vizsgáljuk meg, hogy dt idő alatt milyen dγ szöggel fordul el az M szakasz! Az M szakasz felső pontja $v_x+(dv_x/dy)dy$, alsó része pedig v_x sebességgel mozog. A dt időtartamra jutó elfordulást, dγ -t a megtett út különbségének dy-nal való osztásával kapjuk meg.



3. ábra Sebességmegoszlás a folyadékrétegben

Az egységnyi időre jutó szögelfordulás, azaz a **deformációsebesség** pedig dt-vel való osztás után adódik:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv_x}{dy} \tag{1}$$

Felírható a deformációsebesség (vagy alakváltozási sebesség) és a csúsztatófeszültség közötti egyenes arányosságot kifejező összefüggés, azaz a **Newton-egyenlet** amelyben η [Pa·s] egy, a folyadék tulajdonságaitól függő értékű arányossági tényező, amelyet **dinamikai viszkozitásnak** nevezünk:

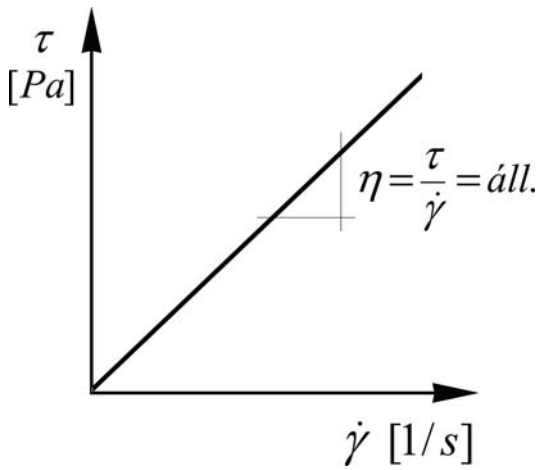
$$\tau = \eta\dot{\gamma} = \eta\frac{d\gamma}{dt} = \eta\frac{dv_x}{dy} \tag{2}$$

Az η anyagjellemző értékétől függ, hogy adott anyagnál egy adott deformációsebesség előállításához milyen csúsztatófeszültségre van szükség. A newtoni viszkozitási törvényt megvizsgálva érdekes következtetéseket vonhatunk le: ha a $\dot{\gamma}$ deformációsebesség zérushoz tart, akkor a csúsztatófeszültség is eltűnik. Ez azt jelenti, hogy – a szilárd anyagokkal ellentétben – a folyadékok nyugvásbeli súrlódása zérus. További különbség, hogy – szemben a szilárd anyagokkal – a folyadékok tetszőleges mértékben deformálhatók belső szerkezetük megváltozása nélkül.

A szilárd fallal érintkező folyadék sebessége közvetlenül a falnál megegyezik a fal sebességével. Ezt az általánosan érvényes és széles körben használt tapasztalatot a tapadás törvényének nevezzük.

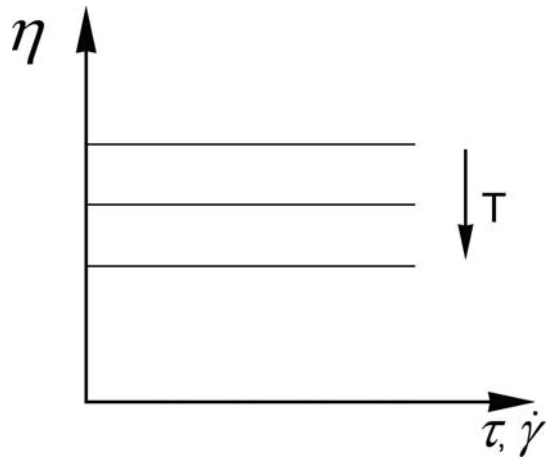
Adott newtoni folyadék esetében az η dinamikai viszkozitás kizárólag a T hőmérséklet függvénye, és így izoterm esetben állandó. Tehát η nem függ az igénybevételtől, azaz sem a τ [Pa] **nyírófeszültség**től, sem pedig a $\dot{\gamma}$ [1/s] **alakváltozási sebességtől (nyírósebességtől)**. Ezért T=áll. esetén η=áll., a **newtoni közeg τ-$\dot{\gamma}$ görbéje** (azaz folyási görbéje) egy egyenes, amit a **Newton-egyenlet** fejez ki (4. ábra):

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \tag{3}$$



4. ábra A newton modell feszültség-deformációsebesség kapcsolata (folyási görbéje)

Tehát a folyadékban ébredő nyírófeszültség nem a deformáció nagyságával, hanem a deformáció sebességével arányos. Az arányossági tényező az η dinamikai viszkozitás. A newtoni közeg viszkozitása független az igénybevételtől ($\dot{\gamma}$,τ), csak a **hőmérséklettől függ** (5. ábra).



5. ábra A newtoni folyadékok viszkozitási görbéjének hőmérséklet-függése

Áramlás kapillárisban

Vizsgáljuk a továbbiakban a **newtoni folyadékoknak** kis átmérőjű csőben, azaz kapillárisban való áramlását, hiszen a folyási mutatószám meghatározására szolgáló készülékben is egy kapillárison kell a vizsgált anyagnak áthaladnia. A kapilláris vázlatát a 6. ábra mutatja.

Számításaink során induljunk ki a newtoni közeg viselkedését leíró (2) összefüggésből, és használjuk fel azt, hogy a $\dot{\gamma}$ alakváltozási sebesség kifejezhető az áramlási sebesség helyszerinti deriváltjával:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} = \eta \frac{dv(r)}{dr} \tag{4}$$

ahol v(r) [m/s] az ömledék áramlási sebessége a hely függvényében, r [m] a kapilláris sugár irányú koordinátája, ($0 \le r \le R$).

A (4) összefüggés rendezésével kapjuk:

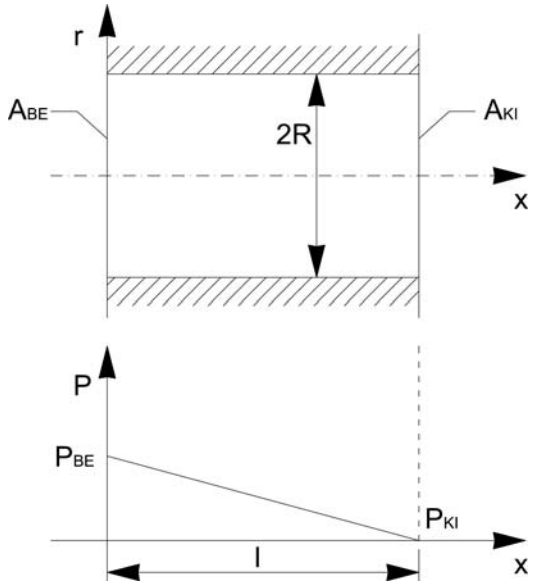
$$\frac{dv(r)}{dr} = \frac{\tau}{\eta} \tag{5}$$

A levezetés folytatásához meg kell határozni a τ feszültség eloszlását a kapilláris keresztmetszete mentén. A **folyadékelem erőegyensúlyára** a kapilláris r sugarának függvényében a következő összefüggés írható fel:

$$2r\pi \cdot l \cdot \tau = r^2 \pi \cdot \Delta p \tag{6}$$

ahol Δp [Pa] a nyomáskülönbség a kapilláris beömlési (A_{be}) és kiömlési (A_{ki}) keresztmetszete

között, l (m), a kapilláris hossza. Azaz az *r* sugarú henger palástján ébredő erő tart egyensúlyt az *r* sugarú henger alapjára ható nyomóerővel ($0 \le r \le R$).



6. ábra A nyomás változása a kapilláris hossza mentén

Feltételezzük továbbá, hogy a fenti (6. ábra) ábrának megfelelően a nyomáscsökkenés a kapilláris hossza mentén lineáris, így a τ..a v és a $\dot{\gamma}$ függvényei a kapilláris sugarának, de nem függvényei a kapilláris hosszának, azaz a kapilláris hossza mentén nem változnak.

Folytatva a levezetést, a (6) egyenlet rendezésével megkapjuk a τ feszültség keresztmetszet menti eloszlását leíró függvényt, mely az áramló anyagtól független, és csak a terheléstől és a kapilláris méreteitől függ:

$$\tau = \frac{\Delta p}{2l} r \tag{7}$$

Az eloszlás kúp alakú, az áramlás a tengelyben feszültségmentes, r=R-nél éri el maximális értékét.

A τ **feszültség** tehát **a sugárral lineárisan arányos**, így legnagyobb értékét éppen r=R-nél, a kapilláris fala mentén veszi fel (7. ábra):

$$\tau_{max} = \tau_{r=R} = \boxed{\tau_f = \frac{\Delta p}{2l} R} \tag{8}$$

A (7) összefüggést (5)-be helyettesítve a következő differenciál egyenletet kapjuk:

$$\frac{dv}{dr} = \frac{\Delta p}{2l\eta} r \tag{9}$$

A (9) differenciál egyenletet rendezve:

$$dv = \frac{\Delta p}{2l\eta} r dr \tag{10}$$

Integrálással kapjuk (10)-ből:

$$v = \frac{\Delta p}{2l\eta} \frac{r^2}{2} + c \tag{11}$$

A c konstans meghatározásához alkalmazzuk a következő peremfeltételt:

$$r=R \text{ helyen } v=0 \tag{12}$$

Ezt (11)-be helyettesítve kapjuk:

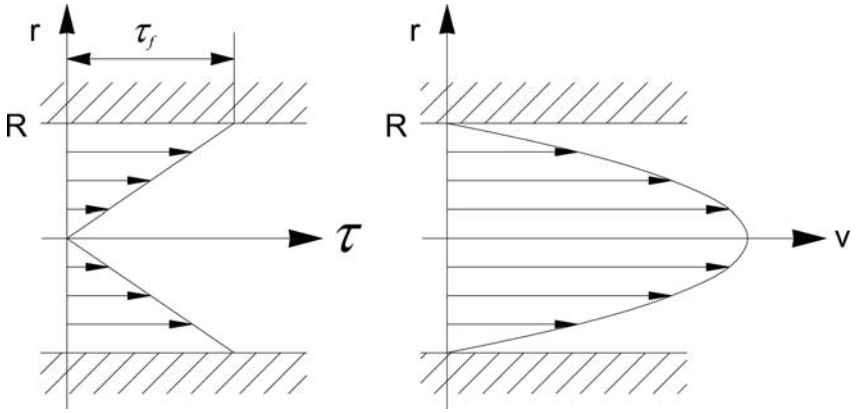
$$0 = \frac{\Delta p}{2l\eta} \frac{R^2}{2} + c \tag{13}$$

A (13) egyenlet rendezésével *c* értékére kapjuk:

$$c = -\frac{\Delta p R^2}{4l\eta} \tag{14}$$

A c állandó értékét (11)-be helyettesítve megkapjuk a v(r) áramlási sebesség keresztmetszet menti eloszlását (7. ábra) leíró függvényt:

$$v = \frac{\Delta p}{4l\eta}(r^2 - R^2) \le 0 \tag{15}$$



7. ábra A τ feszültség és az áramlási sebesség eloszlása a kapilláris

Ez egy paraboloid sebesség eloszlás. A negatív előjel abból adódik, hogy az áramlás és a nyomásnövekedés iránya ellentétes. A gyakorlatban **az áramlási sebesség keresztmetszet menti eloszlására** a következő összefüggés használható:

$$\boxed{v = \frac{\Delta p}{4 l \eta}(R^2 - r^2)} \tag{16}$$

A térfogatáram meghatározása

A sebességeloszlás ismeretében meghatározhatjuk a $\dot{V}$ **[m³/s] térfogatáramot**:

$$d\dot{V} = v(r)dA \rightarrow \dot{V} = \int_0^R 2\pi \cdot r \cdot v(r) \cdot dr \tag{17}$$

A (16) összefüggés behelyettesítésével, majd az integrálás elvégzésével kapjuk:

$$\dot{V} = \frac{\pi \Delta p}{2 l \eta}\int_0^R r(R^2 - r^2)dr = \frac{\pi \Delta p}{2 l \eta}\int_0^R (R^2 r - r^3)dr =$$

$$= \frac{\pi \Delta p}{2 l \eta}\left[\frac{R^2 r^2}{2} - \frac{r^4}{4}\right]_0^R = \frac{\pi \Delta p}{2 l \eta}\left(\frac{R^4}{2} - \frac{R^4}{4}\right) = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 l \eta} \tag{18}$$

Azaz:

$$\boxed{\dot{V} = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot R^4}{8 \cdot l \cdot \eta}} \tag{19}$$

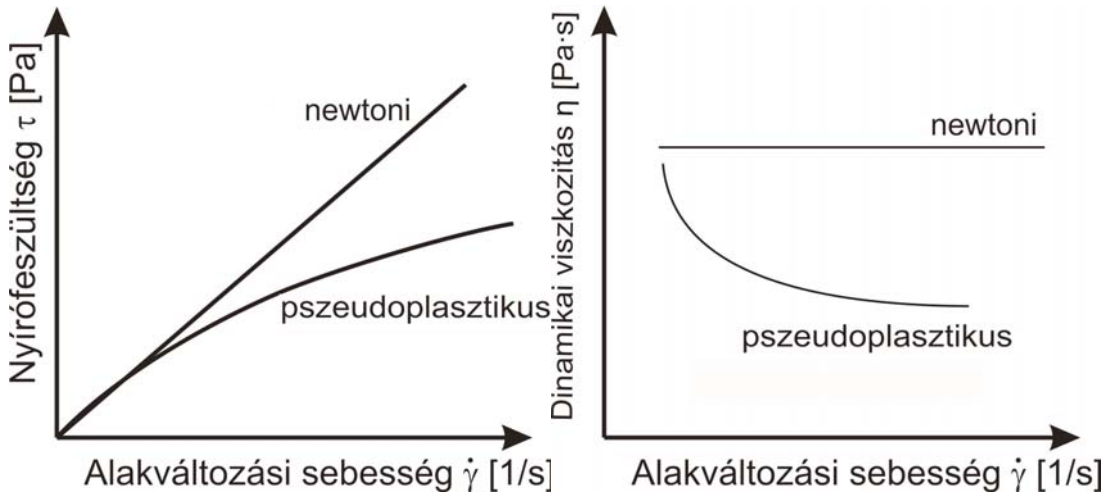
Ez az ún. **Hagen-Poiseuille összefüggés**, amely a reológiai mérések alapjának tekinthető, mivel a $\dot{V}$ térfogatáram mérése nagyon egyszerű, és $\dot{V}$ ismeretében a fenti összefüggéssel az η viszkozitás kiszámítható.

2.2. A valós polimer ömledékek viselkedése

A viszkozitási tényező a polimer ömledékek legfontosabb feldolgozástechnológiai jellemzője. Sajnos, amíg a kis molekulájú anyagok közül pl. a víz, számos oldószer, vagy a kőolaj követi a newtoni viselkedést, addig a polimer ömledékek a feldolgozási tartományban gyakorlatilag *nem*!

A polimer ömledékek esetén az ömledék viszkozitása – állandó hőmérsékleten – az igénybevétel (η, $\dot{\gamma}$) növekedésével csökken. Ezt a fajta viselkedést **pszeudoplasztikusnak** nevezik.

A lenti (8. ábra) ábrán látható $\tilde{\tau}$-$\dot{\gamma}$ függvényt **folyásgörbének**, a belőle megszerkeszthető η=f($\dot{\gamma}$) függvényt **viszkozitásgörbének** nevezzük.

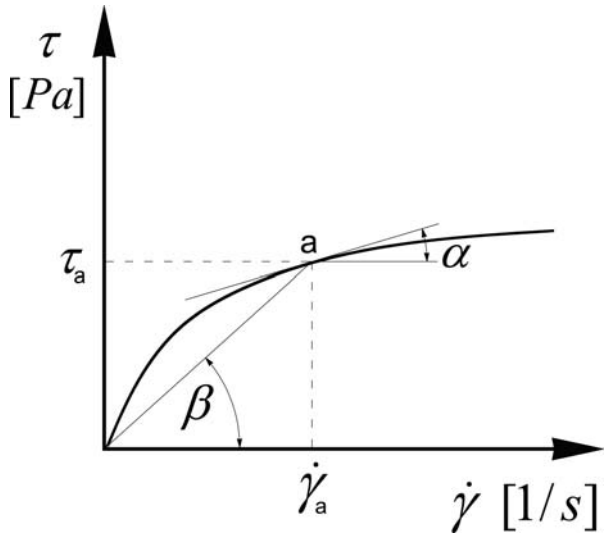


8. ábra Pszeudoplasztikus és newtoni közeg folyási (a) és viszkozitási (b) görbéjének összehasonlítása

A pszeudoplasztikus viselkedést mutató polimer ömledékeknél kétfajta viszkozitási tényezőt különböztetünk meg (9. ábra). Egy tetszőleges *a* pontra:

-Dinamikai viszkozitási tényező: $$\eta_D = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = tg\alpha \qquad (20)$$

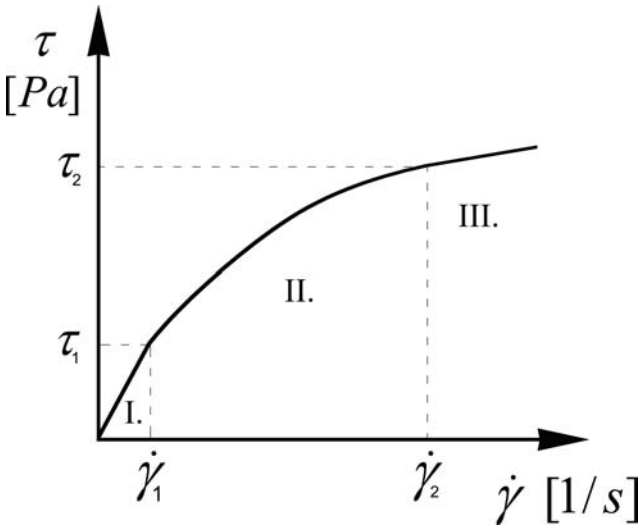
-Látszólagos viszkozitási tényező: $$\eta_a = \frac{\tau_a}{\dot{\gamma}_a} = tg\beta \qquad (21)$$



9. ábra A dinamikai és látszólagos viszkozitási tényező értelmezése

A gyakorlatban az η_a *látszólagos viszkozitási tényezővel* jellemzik az anyagokat.

Mai ismereteink szerint azt mondjuk, hogy a valós polimer ömledék **struktúrviszkózusan** viselkedik. Ennek az a sajátossága, hogy az ömledék extrém kis és extrém nagy igénybevételek tartományában newtoni jelleget mutat (I. és III. tartomány), a kettő között, a feldolgozási technológiák tartományában pedig pszeudoplasztikus (II. tartomány) (10. ábra).



10. ábra A struktúrviszkózus ömledék folyásgörbéje

Az alábbi táblázatban foglaltuk össze a különböző anyagok nyíróigénybevétel során fellépő viselkedését, a γ deformáció és a γ nyírófeszültség összefüggését:

Szilárd testeknél (Hooke)	γ arányos τ-val	$\tau = G \cdot \gamma$
Newtoni folyadékoknál	dγ/dt arányos τ -val	$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$
Nem-newtoni közegeknél	dγ/dt más függvénye τ -nak	$\tau = f(\dot{\gamma})$

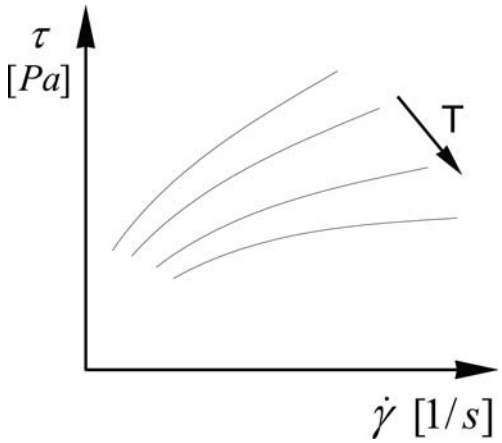
Polimer ömledékek folyási tulajdonságainak modellezése

A pszeudoplasztikus közegek folyási tulajdonságainak a modellezése, a folyási és a viszkozitási görbét megfelelően közelítő függvények felírása igen bonyolult problémát jelent. A legegyszerűbb és leggyakrabban használt ilyen közelítő összefüggést **hatványtörvények** nevezzük.

$$\boxed{\tau = K\dot{\gamma}^n} \tag{21}$$

A hatványtörvénnyel leírható viselkedésű anyagok esetében az ömledékben ébredő τ feszültség a $\dot{\gamma}$ deformációsebesség valamilyen $n>0$ hatványával arányos. A legtöbb polimer ömledéknél $n<1$, azaz az **ömledék viszkozitása az igénybevétel növekedésével csökken**, ami megfelel az előző pontban tárgyalt pszeudoplasztikus viselkedésnek.

A pszeudoplasztikus közegek folyási görbéjének hőmérsékletfüggését szemlélteti a 11. ábra. Az ábrán jól megfigyelhető a folyási görbe meredekségének, azaz a dinamikai viszkozitásnak a hőmérséklet növekedésével végbemenő csökkenése. Polimer ömledékek esetében – bizonyos határok között – a hőmérséklet növelésével **exponenciálisan csökken** a dinamikai viszkozitás.

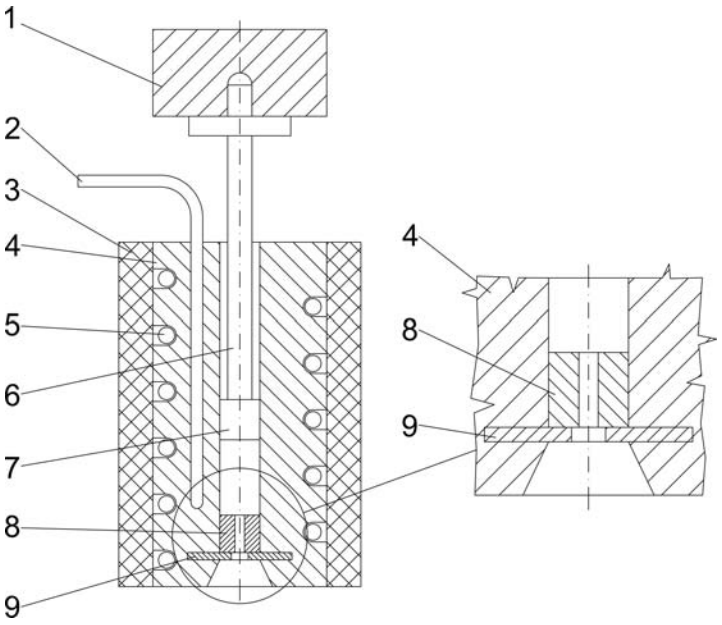


11. ábra Pszeudoplasztikus közeg folyásgörbéjének hőmérsékletfüggése

A kismolekulájú folyadékokkal szemben – mint amilyen például a víz és a hidraulikaolaj – a polimer ömledékek bizonyos mértékben **összenyomhatóak**, azaz a nyomás növekedésével nő a sűrűségük.

2.3. A folyóképesség, a folyási mutatószám és szabványos meghatározása

A folyóképesség a hőre lágyuló polimerek fontos reológiai tulajdonsága. **Folyóképesség** (Φ) alatt a **dinamikai viszkozitás** (η [Pas]) **reciprokát értjük**. A **folyóképesség** gyakorlati jellemzésére a könnyen és egyértelműen meghatározható, szabványos **folyási mutatószám** használatos. Jele **MFI** (Melt Flow Index, [g/10 perc]) vagy pedig **MFR** (Melt Flow Rate, [g/10 perc]). **A szabványos folyási mutatószám** az a grammokban kifejezett anyagmennyiség, amely a vizsgálati és anyagszabványban előírt hőmérséklet és nyomás mellett a szabványos mérőkészülék kifolyónyílásán 10 perc alatt kifolyik. A folyási mutatószám meghatározására szolgáló készülék, a **kapilláris plasztométer** vázlata a 12. ábrán látható.



1. terhelő súly
2. hőelem
3. hőszigetelés
4. acélhenger
5. elektromos fűtés
6. dugattyúrúd
7. dugattyú
8. kapilláris
9. tartólap

12. ábra A kapilláris plasztométer vázlata

A (7) dugattyú a (4) fűtött acélhengerben lévő megömlesztett anyagra nyomást gyakorol, és azt a (8) szabványos kapillárison át kisajtolja. A henger az (5) fűtőtesttel fűthető. A hőmérséklet a (2) hőelemmel mérhető és hőfokszabályozóval a kívánt értékre beállítható. A szükséges nyomást az (1) súllyal lehet biztosítani.

A szabványos körülmények között elvégzett vizsgálat kiértékelése:

A berendezés önállóan az **MVR** (Melt Volume Rate) **térfogatáram** mérésére képes, amit az alábbi összefüggéssel lehet meghatározni:

$$\boxed{MVR_{(T,F)} = \frac{V \cdot s}{t}} \qquad (22)$$

ahol: MVR [cm^3/10 perc]; térfogatáram,
T [°C]; a vizsgálati hőmérséklet,
F [N]; a terhelő erő (súly),
s [-]; a szabványos időnek (10 perc=600 s) megfelelő szorzótényező, s=600
t [s]; az az idő, amely alatt a V anyagmennyiséget a dugattyú a készülékből kisajtolja,
V [cm^3]; az az anyagmennyiség, amelyet a dugattyú a készülékből t idő alatt kisajtolt.

Ha megmérjük a kifolyt polimerömledék tömegét, annak segítségével kiszámítható a **folyási mutatószám** (**MFI**, Melt Flow Index):

$$\boxed{MFI_{(T,F)} = \frac{m \cdot s}{t}} \tag{23}$$

ahol: MFI [g/10 perc]; a folyási mutatószám,
T [°C]; a vizsgálati hőmérséklet,
F [N]; a terhelő erő (súly),
s [-]; a szabványos időnek (10 perc=600 s) megfelelő szorzótényező, s=600
t [s]; az az idő, amely alatt az m anyagmennyiséget a dugattyú a készülékből kisajtolja,
m [g]; az az anyagmennyiség, amelyet a dugattyú a készülékből t idő alatt kisajtolt.

A **folyási mutatószám lényegében tömegáram**, a vizsgált polimer tömegárama a szabványban előírt **hőmérséklet** és **terhelő erő** mellett. A kapilláris plasztométer lehetővé teszi a vizsgált polimer tömegáramának tetszés szerinti (a készülék lehetőségeinek határain belüli) hőmérséklet és terhelő erő melletti meghatározását. **A tömegáram ismeretében a polimerömledék reológiai jellemzői kiszámíthatók**. Így ezzel a viszonylag egyszerű és gyors mérési eljárással lehetőségünk van **a folyási mutatószám meghatározása mellett a vizsgált anyag folyási és viszkozitási görbéjének a felvételére** is. Az MFI eljárás előnye más viszkozitásmérési módszerekhez képest egyszerűsége és gyorsasága, ezért **széles körben használják a gyakorlatban, főként minőség-ellenőrzés céljára**.

Az MFI értékének megadási módját szabvány írja elő. Így például az MFI=4,0 (2,16/190) azt jelenti, hogy 2,16 kg-os súly alkalmazásával, 190 °C hőmérsékleten az adott anyag folyási mutatószáma 4 g/10 perc.

2.4. Az MFI mérés kiértékelkése

Az MFI készülék önállóan az MVR [cm^3/10min] térfogatáram mérésére alkalmas. A kapillárison távozó ömledék tömegét mérlegen kell lemérnünk. Így a mérést követően az alábbi adatok állnak rendelkezésünkre:

- MVR (térfogatáram) [cm^3/10min]
- t [s] az idő, amely alatt az m anyagmennyiséget a dugattyú a készülékből kisajtolja
- m [g] az anyagmennyiség, amelyet a dugattyú a készülékből t idő alatt kisajtolt

Felhívjuk a figyelmet arra, hogy az MFI mérés során élünk azzal az egyszerűsítéssel, hogy a polimer ömledék pszeudoplasztikus jellegét nem vesszük figyelembe, hanem **ideális newtoni közegként kezeljük** (lásd **a 2.1. és 2.2. fejezetet**).

A viszkozitási görbe megrajzolásához szükséges adatokat az alábbi módon lehet kiszámítani:

A $\dot{V}$ [m^3/s] térfogatáramot az MVR értékéből az alábbi összefüggéssel lehet meghatározni:

$$\boxed{\dot{V} = \frac{\mathrm{MVR}}{\mathrm{s} \cdot 10^6}} \tag{24}$$

ahol: $\dot{V}$ [m^3/s]; térfogatáram,
MVR [cm^3/10 perc]; a berendezés által mért térfogatáram,
s [-]; a szabványos időnek (10 perc=600 s) megfelelő szorzótényező, s=600

A 10^6-al való osztás a [cm^3]-ről [m^3]-re való átszámítás miatt szükséges.

Az **MFI** értékét a (23) képlettel lehet meghatározni.

Az alábbi összefüggéssel lehet meghatározni a $\dot{G}$ [kg/s] tömegáramot az MFI-ből:

$$\boxed{\dot{G} = \frac{\mathrm{MFI}}{\mathrm{s} \cdot 10^3}} \tag{25}$$

ahol: $\dot{G}$ [kg/s]; tömegatáram,
MFI [g/10 perc]; a folyási mutatószám,,
s [-]; a szabványos időnek (10 perc=600 s) megfelelő szorzótényező, s=600

A 10^3-al való osztás a [g]-ról [kg]-ra való átszámítás miatt szükséges.

A vizsgált anyag ρ [kg/m^3]sűrűségét kiszámíthatjuk a $\dot{V}$ térfogatáram és a $\dot{G}$ tömegatáram ismeretében:

$$\boxed{\rho = \frac{\dot{G}}{\dot{V}}} \tag{26}$$

A beömlési keresztmetszetnél ébredő nyomást jól közelíthetjük a készülék dugattyújának D átmérője és az alkalmazott pótsúly F súlyereje alapján számított nyomással:

$p_{be} = \frac{4}{D^2 \pi} F$, azaz:

$$\boxed{\Delta p = \frac{4}{D^2 \pi} F} \tag{27}$$

Feltételezzük továbbá, hogy a 6. ábrának megfelelően a nyomáscsökkenés a kapilláris hossza mentén lineáris, így a τ a v és a $\dot{\gamma}$ függvényei a kapilláris sugarának, de nem függvényei a kapilláris hosszának, azaz a kapilláris hossza mentén nem változnak.

A τ feszültség keresztmetszet menti eloszlását (7. ábra) leíró függvényt, mely az áramló anyagtól független, és csak a terheléstől és a kapilláris méreteitől függ a (7) összefüggés mutatja. Az eloszlás kúp alakú, az áramlás a tengelyben feszültségmentes, r=R-nél, a kapilláris fala mentén éri el maximális értékét (lásd a (8) összefüggést):

$$\tau_{max} = \tau_{r=R} = \boxed{\tau_f = \frac{\Delta p}{2l} R} \tag{28}$$

A **Hagen-Poiseuille összefüggés** (19) segítségével kiszámítható az η dinamikai viszkozitás:

$$\boxed{\eta = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot R^4}{8 \cdot l \cdot \dot{V}}} \tag{29}$$

A (4) összefüggés rendezésével, (7) behelyettesítésével és η ismeretében a $\dot{\gamma}$ **alakváltozási sebesség keresztmetszet menti eloszlását** leíró függvényt kapjuk:

$$\boxed{\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta} = \frac{\Delta p}{2l\eta} \cdot r} \tag{30}$$

A $\dot{\gamma}$ keresztmetszet menti eloszlásának jellege azonos a τ eloszlásának jellegével (7. ábra), hiszen csak egy konstans szorzóban különböznek. A $\dot{\gamma}$ legnagyobb értékét, hasonlóan τ-hoz, a kapilláris fala mentén veszi fel:

$$\boxed{\dot{\gamma}_{max} = \dot{\gamma}_{r=R} = \frac{\Delta p}{2l\eta} \cdot R = \frac{\tau_f}{\eta} = \dot{\gamma}_f} \tag{31}$$

A hőre lágyuló polimerek két nagyobb csoportja, a **részben kristályos** és az **amorf** polimerek között jelentős különbség van reológiai és feldolgozástechnológiai szempontból. Míg az amorf hőre lágyuló műanyagok széles hőmérséklettartományban lágyulnak, addig a részben kristályos termoplasztoknál ez a folyamat gyors, néhány °C hőmérséklettartományban lezajlik.

Az egyes hőre lágyuló polimerek reológiai tulajdonságainak ismerete szükséges ahhoz, hogy kiválaszthassuk az adott feldolgozási technológiához megfelelő anyagot. Növekvő sebesség, illetve igénybevétel mellett történő feldolgozás esetén kisebb viszkozitású anyaggal lehet elérni az

optimális feldolgozási paramétereket. A viszkozitás szoros összefüggésben van az átlagos molekulatömeggel, ezért a molekulatömeg alapján szintén lehetséges a hőre lágyuló polimerek osztályozása az alkalmazható feldolgozási technológiák szerint.

Tájékoztatásul a következő táblázatban néhány feldolgozási technológiára vonatkozóan a fellépő alakváltozási sebességek tartománya található, természetesen csak durva, nagyságrendi arányokat jelölve. A nyilak a növekedés irányát jelzik.

Feldolgozási technológia	Nyírósebesség		Dinamikai viszkozitás		Átlagos molekulatömeg		Folyási mutatószám
	$\dot{\gamma}$ [1/s]		η [Pa·s]		M_W [g/mol]		MFI [g/10min]
Sajtolás	10	↓	10 000	↑	$>10^6$	↑	↓
Kalanderezés	10^2		1000		10^5		
Extrudálás	10^3-10^4		100-1000		10^5		
Fröccsöntés	10^4-10^6		10-100		10^4		
Szálgyártás	$>10^6$		10		10^3		

3. A mérés leírása, elvégzendő feladatok

A mérés menete:

A granulátumot az MFI mérő készülék felfűtött hengerébe töltjük, közben tömörítjük a légzárványok kihajtása céljából. A töltést akkor fejezzük be, amikor a polimer granulátum szintje a henger felső pereme alatt kb. 5-10 mm-re van. A dugattyúrudat a hengerbe helyezzük, majd a terhelő súlyokat tartó állványt mérő helyzetbe fordítjuk, és rögzítjük. Elindítva az MFI berendezéshez kapcsolt számítógépen a vezérlőprogramot, a berendezés egy előre meghatározott előmelegítési idő elteltével (ennek célja, hogy a hengerben lévő granulátum teljes egészében ömledékállapotba kerüljön) előtömörítést végez (az ömledéket összenyomva kiszorítja a levegőbuborékokat), majd a súlyokat a dugattyúrúdra helyezi. Ennek hatására a kapillárison keresztül megkezdődik a polimerömledék kiáramlása. Akkor kezdődik a mérés, amikor a készüléken található vágószerkezet kése levágja az extrudátumot (ezt a kezdeti darabot nem használjuk). A mérés végeztével, miután a dugattyúrúd megtett egy előre meghatározott hosszúságú utat a hengerben, a készüléken található vágószerkezet kése ismét levágja az extrudátumot. A levágott extrudátumot csipesszel (még meleg!) a mérleg tányérjára helyezzük, és leolvassuk a

tömegét. Mivel a berendezés csak térfogatáramot mér, az extrudátum tömegét nekünk kell lemérni, de az összes többi szükséges paramétert (térfogatáram, eltelt idő) le lehet olvasni a berendezésről.

A mérés során két különböző típusú polipropilén alapanyagot vizsgálunk, mindkettő a TVK gyártmánya. A *Tipplen H949* kisebb viszkozitású anyag, elsősorban fröccsöntésre, míg a *Tipplen H483F* nagyobb molekulatömegű és ennél fogva nagyobb viszkozitású extrúziós alapanyag.

A mérésen elvégzendő feladatok:

- A vizsgált anyag tömeg- és térfogatáramának meghatározása kapilláris plasztométerrel állandó hőmérséklet és különböző terhelések mellett. (MÉRÉS)
- A térfogatáram alapján az adott terhelés mellett érvényes MFI, MVR, η, τ_f és $\dot{\gamma}_f$ kiszámítása az útmutatóban leírtak szerint. (MÉRÉS KIÉRTÉKELÉS)
- A vizsgált anyag viszkozitási görbéjének ábrázolása.

4. A mérés során használt gépek, berendezések

- MFI mérő berendezés
- század gramm pontosságú mérleg

5. A témához kapcsolódó fontosabb szavak angolul, németül

Magyar	Angol	Német
Folyásgörbe	Flow curve	die Fließkurve
Folyási mutatószám, MFI	Melt Flow Index (MFI) Melt Flow Rate (MFR)	der Schmelzindex
Nyírófeszültség	Shear stress	die Schubspannung
Nyírósebesség	Shear rate	die Schergeschwindigkeit das Schergefälle

6. Ajánlott irodalom

1. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000, 115-144. old.

MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV

Név: ..... Jegy: .....

Neptun kód: .....

Dátum: ..... Ellenőrizte: .....

Gyakorlatvezető: _____

1. Feladat

- A vizsgált anyag tömeg- és térfogatáramának meghatározása kapilláris plasztométerrel állandó hőmérséklet és különböző terhelések mellett.
- A tömeg- és térfogatáram alapján az adott terhelés mellett érvényes MFI, MVR, η, τ_f és $\dot{\gamma}_f$ kiszámítása.
- A vizsgált anyag folyásgörbéjének ábrázolása.

2. Alapadatok, mért és számított eredmények

A készülék típusa:	**CEAST Modular Melt Flow 7027.000**
A vizsgált anyag megnevezése:	
Kapilláris hossza, l	**8 mm**
Kapilláris sugara, R	**1 mm**
Dugattyú átmérője, D	**9 mm**
Vizsgálati hőmérséklet, T	

A mérés során két különböző típusú polipropilén alapanyagot vizsgálunk, mindkettő a TVK gyártmánya. A *Tipplen H949* kisebb viszkozitású anyag, elsősorban fröccsöntésre, míg a *Tipplen H483F* nagyobb molekulatömegű és ennél fogva nagyobb viszkozitású extrúziós alapanyag.

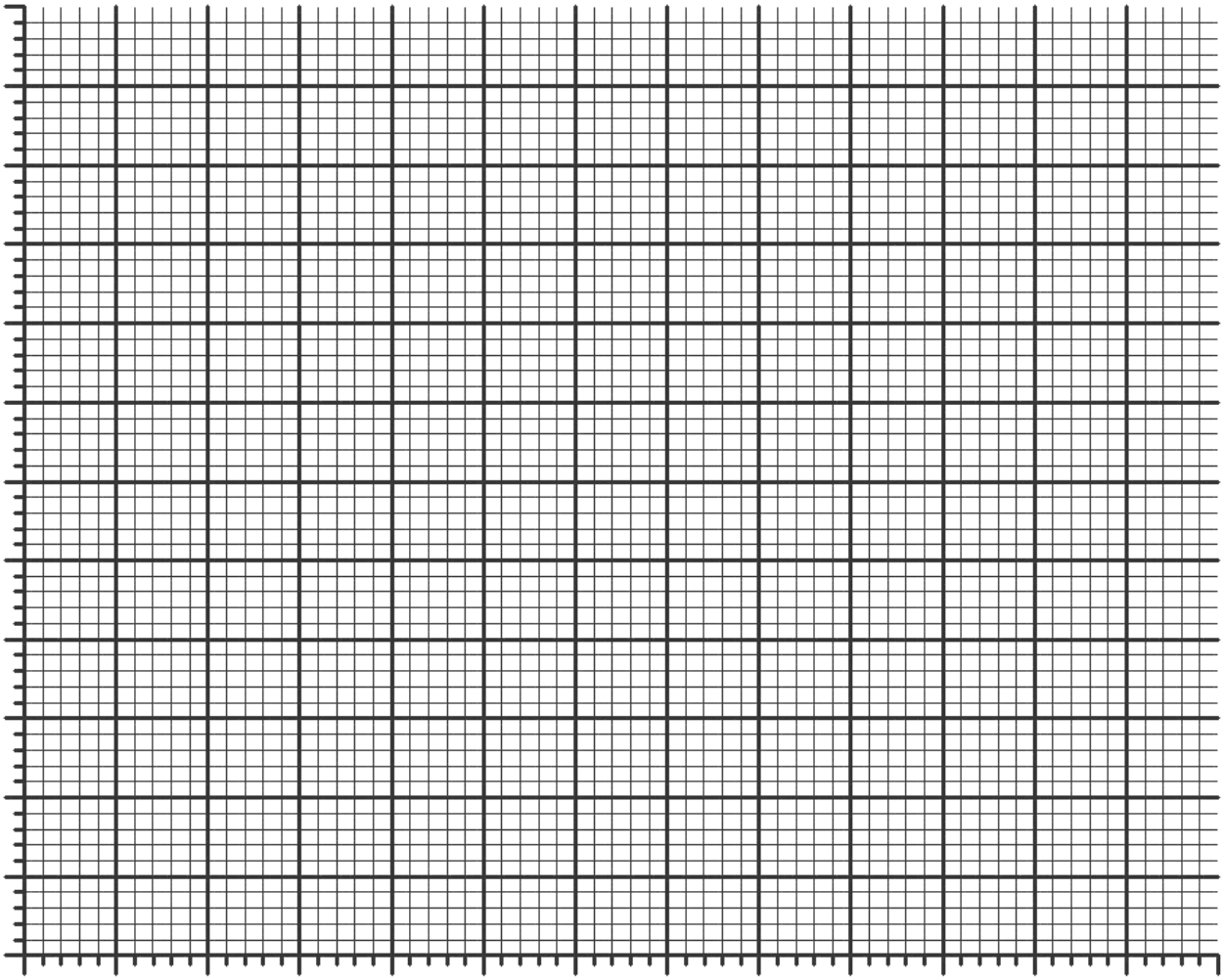
3. A mért és számított eredmények

Tipplen H483F

Mért adatok				Számított adatok							
F [N]	MVR [cm^3/600s]	t [s]	m [g]	$\dot{V}$ [m^3/s]	MFI [g/600s]	$\dot{G}$ [kg/s]	ρ [kg/m^3]	Δp [MPa]	τ_f [MPa]	η [Pa·s]	$\dot{\gamma}_f$ [l/s]
12											
21,6											
50											
100											
216											

Tipplen H949

Mért adatok				Számított adatok							
F [N]	MVR [cm^3/600s]	t [s]	m [g]	$\dot{V}$ [m^3/s]	MFI [g/600s]	$\dot{G}$ [kg/s]	ρ [kg/m^3]	Δp [MPa]	τ_f [MPa]	η [Pa·s]	$\dot{\gamma}_f$ [l/s]
21,6											

4. A vizsgált anyagok folyásgörbéje

A koordinátatengelyeken tüntesse fel a mennyiségeket és a hozzájuk tartozó mértékegységet.