

# Makromolekulás oldatok tulajdonságai

Elméleti alap: P.W. Atkins: *Fizikai Kémia*, 26.1–3 (4. kiadás), vagy 25.1–3 (6. kiadás) fejezetek.

Gyakorlat típusa: Egyéni.

Gyakorlat célja: Polimeroldatok viszkozitásának vizsgálata Ostwald-féle kapilláris viszkoziméterrel, ill. a vizsgált polimer konformációs jellemzőinek számítása a mért viszkozitásértékek alapján.

## 1. Bevezetés

### 1.1. Az ideális és a reális statisztikus gombolyag

A makromolekulás oldatok tulajdonságainak elemzésekor az egyik legfontosabb kérdés az, hogy milyen a monomerekből felépülő polimerlánc konformációja az oldatban. A makromolekulás gombolyag szegmenseinek<sup>1</sup> térbeli elrendeződése, az oldószer és a polimerlánc közötti kölcsönhatások (szolvatáció) alapvetően meghatározzák az oldat tulajdonságait. A makromolekuláknak változatos szerkezetük van, azonban a két legjellemzőbb fajtájuk a hálószerű szerkezettel jellemezhető (térhálós), valamint a láncszerkezettel jellemezhető (lineáris) makromolekula. Utóbbi esetén a szerkezeti egység (monomer) kémiai összetétele szerint lehetnek jelentős különbségek, de a láncszerű molekulák alakai sajátságai (konformáció) és az ezáltal megszabott fizikai tulajdonságok szempontjából sokkal kevésbé különböznek egymástól, mint egy hasonló kémiai összetételű térhálós óriásmolekulától. A lánc szerkezete a szerkezeti egység (monomer) fajtája szerint különbözhet ugyan, de ezek a különbségek a molekula alakjának és az ezáltal megszabott fizikai tulajdonságoknak a szempontjából nem változtatják meg alapvetően a polimerlánc viselkedését. Egy tetszőleges, szabad rotációs lehetőségekkel bíró láncmolekulát mindig a legnagyobb termodinamikai valószínűsége, maximális entrópiájú állapot jellemzi. A polimerlánc alakját és méretét a statisztikus gombolyag tulajdonságainak ismeretében tanulmányozhatjuk, mivel a hosszú láncmolekuláknak ez a legvalószínűbb alakja.

A polimerek molekuláinak összegombolyodottságát először W. Kuhn ismerte fel (1934). A statisztikus gombolyagot az ún. „bolyongási” statisztikával írta le, melynek problémája a Brown-mozgásból ismert. Eszerint az összegombolyodott, ideális lánc közepes hossza, vagyis az átlagos statisztikus láncvégtávolság  $\langle h^2 \rangle_0^{1/2}$ :

$$\langle h^2 \rangle_0 = n \cdot l^2, \text{ vagy } \langle h^2 \rangle_0^{1/2} = l \cdot n^{1/2}, \quad (1)$$

ahol  $n$  az ún. statisztikus szegmensszám,  $l$  pedig a statisztikus szegmenshossz. Az (1) egyenlet szerint definiált  $\langle h^2 \rangle_0^{1/2}$  egy lehetséges mértéke a gombolyag közepes átmérőjének. Mivel az  $n$  szegmensszám arányos az  $M$  molekulatömeggel, ezért a statisztikus láncvégtávolság és a molekulatömeg között érvényes az ún. Kuhn-féle gyökös törvény:

$$\langle h^2 \rangle_0^{1/2} = \text{konst} \cdot M^{1/2}. \quad (2)$$

A teljesen szabad rotációt azonban gátolja a C–C vegyértékkötések szögének állandósága (vegyértékszög-lánc-modell), a C–C kötések mentén lehetséges rotáció korlátozottsága (gátolt rotációjú vegyértékszög-lánc-modell) és a tiltott térfogat effektus. A polimerláncnak meghatározott saját térfogata van, így a térnek azt a részét, amelyben éppen a meghatározott láncrész található, másik láncrész nem foglalhatja el (tiltott térfogat hatás). A „bolyongási” modell által leírt statisztikus gombolyag valójában csak közelítés, amelytől a reális gombolyagok – igen híg oldatban is – a lánc kémiai szerkezetétől, az oldószerrel és hőmérséklettől függően eltérnek. A polimermolekulák láncszegmenseit az oldószermolekulák szolvatálják, ez a gombolyag alakját, méretét szintén megváltoztatja. A lánc szerkezetétől és az oldószer természetétől függően lehetséges, hogy a láncszegmensek az oldószerrel való kapcsolódás helyett intramolekuláris kölcsönhatások révén kapcsolódnak össze, ami a gombolyag kontrakcióját eredményezi.

<sup>1</sup>A szegmens a polimer molekula termikus szempontból önálló egységként viselkedő része, mely nagyobb, mint a lánc ismétlődő egysége.

Az egy és ugyanazon gombolyag különböző szegmensei között kialakuló asszociációs törekvés (kontrakció) és a szolvatáció láncmerevítő hatása következtében létrejövő kigombolyodás (expanzió) mindig egyensúlyban van egymással. Jól szolvatáló oldószerben az expansziós, rossz oldószerben a kontrakciós hatás a nagyobb. Vannak olyan oldószer, ill. oldószer elegyek, amelyekben mindkét hatás egyenlő mértékű, és így a gombolyag látszólag kölcsönhatásmentes, vagyis kvázi-ideális állapotban van. A hőmérséklet emelésekor a szolvatáció hatása kerülhet előtérbe, míg a hőmérséklet csökkenésekor a láncszegmensek kölcsönös vonzása lehet meghatározó. Elvileg minden polimer – oldószer rendszerhez tartozik egy olyan hőmérséklet, amelyen a két hatás éppen kompenzálja egymást. Ezt  $\Theta$ -hőmérsékletnek, vagy Flory-hőmérsékletnek nevezzük. Az az állapot pedig, amelyben e hatás megvalósul, a  $\Theta$ -állapot.  $\Theta$ -állapotban tehát az oldószer – polimer és a polimer – polimer kölcsönhatások úgy kompenzálják egymást, hogy a statisztikus gombolyag méretét kizárólag a kémiai szerkezet által megszabott flexibilitás határozza meg.  $\Theta$ -állapotban így érvényesek az ideális statisztikus gombolyagra vonatkozó megállapítások és összefüggések. A láncmolekula kigombolyodása Flory szerint az  $\alpha$  expansziós faktorról fejezhető ki a  $\langle h^2 \rangle = \langle h^2 \rangle_0 \cdot \alpha^2$  reális láncvégtávolság figyelembevételével:

$$\langle h^2 \rangle = \langle h^2 \rangle_0 \cdot \alpha^2, \quad (3)$$

ahol  $\langle h^2 \rangle_0$  kísérletileg kizárólag  $\Theta$ -állapotban határozható meg. Az expansziós faktor értéke így  $\Theta$ -állapotban  $\alpha = 1$ , amely az  $\alpha$  értékének reális minimuma. Laboratóriumi körülmények között a  $\Theta$ -hőmérséklet csak néhány oldószer – polimer rendszerrel állítható be, ezért az adott makromolekulára a  $\Theta$ -állapotot az adott hőmérsékleten egy oldószer – kicsapószer elegyben lehet megvalósítani. A kicsapószer fokozatos adagolásával tehát megvalósítható az adott hőmérsékleten a  $\Theta$ -állapot, azaz amikor a polimermolekulák a fent említett kompenzációk folytán látszólag kölcsönhatásmentes állapotba kerülnek. Az ehhez tartozó összetélt  $\Theta$ -elegy összetételnek nevezzük. A  $\Theta$ -elegy összetélt túllépve a polimermolekula – molekulatömegétől függően – az erős asszociációs kölcsönhatások előtérbe kerülése miatt kicsapódik a rendszerből, fázisátválás történik. A kicsapódás a rendszer zavarosságának növekedésével, vagy koacervátum cseppek megjelenésével észlelhető.

## 1.2. Polimeroldatok viszkozitása

A polimeroldatok viszkozitása függ az oldószer viszkozitásától, a polimer-koncentrációtól, a hőmérséklettől és a makromolekula méretétől és alakjától. A molekulatömeg viszkozimetriás meghatározása ez utóbbiak jellemzésén alapul. A makromolekula méretét annak kémiai szerkezete és a szolvatációja határozza meg.

A makromolekulás anyagok molekulatömegének meghatározására szolgáló módszerek közül a Staudinger által bevezetett viszkozimetriás eljárás terjedt el a legjobban a kutatási és az ipari gyakorlatban. Gömb alakú kolloid részecskék oldatainak relatív viszkozitása ( $\eta_{rel}$ ) – az Einstein-összefüggés szerint – kizárólag azok térfogattörtjétől függ:

$$\eta_{rel} = 1 + 2,5 \cdot \varphi, \quad (4)$$

ahol  $\eta_{rel} = \eta/\eta_0$ , vagyis a relatív viszkozitás megadja, hogy az oldat  $\eta$  viszkozitása hányszor nagyobb az oldószer  $\eta_0$  viszkozitásánál. A  $\varphi$  térfogattört megadható a polimer  $m$  tömegének, és a gombolyag  $\rho_g$  sűrűségének és az oldat  $V$  térfogatának ismeretében:

$$\varphi = \left( \frac{m}{\rho_g} \right) \cdot V^{-1} = \frac{c}{\rho_g}, \quad (5)$$

ahol  $c$  a polimeroldat koncentrációja (g/mL). Az (5) kifejezést a (4) egyenletbe helyettesítve kapjuk a (6) és (7) összefüggést:

$$\eta_{rel} = 1 + 2,5 \cdot \frac{c}{\rho_g}, \quad \text{illetve:} \quad (6)$$

$$\frac{(\eta_{rel} - 1)}{c} = \frac{2,5}{\rho_g} = \frac{\eta_{sp}}{c}, \quad (7)$$

ahol  $\eta_{sp}$  a specifikus viszkozitás, míg  $\eta_{sp}/c$  az ún. redukált viszkozitás.

A (7) egyenlet csak akkor érvényes, ha az áramlásban lévő makromolekulás gombolyagok közötti kölcsönhatás elhanyagolható, vagyis csak nagyon híg oldatokat vagy extrapolált határértékeket használhatunk. Ezért  $\eta_{sp}/c$  adatainkat a koncentráció függvényében kell ábrázolni és a  $c = 0$  g/mL koncentrációra extrapolált ún.  $[\eta]$  határviszkozitást<sup>2</sup> használhatjuk fel a molekulatömeg meghatározására:

$$\lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta_{sp}}{c} = [\eta] = \frac{2,5}{\rho_g} \quad (8)$$

A (8) összefüggésből látható, hogy a polimerek oldásakor tapasztalható viszkozitásnövekedés fordítva arányos a  $\rho_g$  átlagos gombolyagsűrűséggel. A statisztikus gombolyag sűrűsége ugyanis a növekvő molekulatömeggel csökken, mégpedig a Kuhn-féle gyökös törvény szerint:

$$\rho_g = K_p \cdot M^{-1/2} \quad (9)$$

A (9) egyenletet az Einstein-összefüggéssel ((4) egyenlet) egybevetve a (10) egyenletet kapjuk, amely a Kuhn-féle viszkozitástörvény ideális statisztikus gombolyagot tartalmazó – vagyis a  $\Theta$ -állapotban lévő oldatra:

$$[\eta] = \frac{2,5}{K_\eta} \cdot M^{-1/2} = K'_\eta \cdot M^{1/2} \quad (10)$$

Ha a szolvatáció a polimerlánc kigombolyodását eredményezi, a  $\rho_g$  gombolyag sűrűség tovább csökken, ami a (10) egyenlet exponensét növeli és így 0,5 helyett egy a szolvatációtól függő  $a$  értékkel számolunk. A határviszkozitás adott szolvatáció esetében az ún. Kuhn – Mark – Houwink-egyenlettel<sup>3</sup> adható meg:

$$[\eta] = K_\eta \cdot M^a, \quad (11)$$

ahol  $K_\eta$  a polimertől, az  $a$  kitevő pedig az oldószer – polimer kölcsönhatástól függő állandó, értéke általában 0,5 – 0,85 között változik. A (11) egyenlet csak akkor használható relatív molekulatömeg meghatározásra, ha az egyes polimerfrakciók móltömegét előzetesen, független mérésekkel meghatároztuk és  $\lg [\eta] - \lg M$  függvényből az adott oldószer – polimer rendszerre jellemző konstansokat számítjuk. Polimer kézikönyvekben<sup>4</sup> nagyszámú polimer – oldószer párra megtalálhatók a konstansok numerikus értékei. A Kuhn – Mark – Houwink-egyenlet  $K_\eta$  és  $a$  állandóit adott hőmérsékleten a molekulatömeg viszkozimetriás meghatározásához az 1. táblázat mutatja.

A polimeroldatok relatív viszkozitását a legegyszerűbben az Ostwald-féle kapilláris viszkoziméterrel határozhatjuk meg a kifolyási idők mérésével. Mivel a Hagen – Poiseuille-törvény szerint az  $\eta$  viszkozitás, állandó átáramló térfogat és azonos készülék méret esetén, a  $t$  kifolyási idő és a közeg sűrűségének szorzatával arányos:

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1 = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \frac{t \cdot \rho - t_0 \cdot \rho_0}{t_0 \cdot \rho_0} \approx \frac{t - t_0}{t_0} \quad (12)$$

Mivel az oldat és az oldószer sűrűsége csak kevéssé különbözik, elegendő a  $t$  kifolyási időket a különböző koncentrációknál mérni. Az így meghatározott  $\eta_{sp}/c$  adatokat  $c$  függvényében ábrázolva megkapjuk  $[\eta]$  határviszkozitást (1. ábra)<sup>5</sup>. Az  $\eta_{sp}/c$  görbe emelkedése gyakran leírható az empirikus Huggins-egyenlettel:

$$\frac{\eta_{sp}}{c} = [\eta] + K_H \cdot [\eta]^2 \cdot c \quad (13)$$

A (13) egyenlet második tagjában  $K_H \cdot [\eta]^2$  együttható az oldószer jóságára jellemző, vagyis az oldószer-polimer kölcsönhatás erősségének mértéke.

<sup>2</sup> Angol szakirodalomban: intrinsic viscosity vagy Staudinger index.

<sup>3</sup> Egyes forrásokban „Mark – Houwink”, másokban „Kuhn – Mark – Houwink – Sakurada” egyenlet ill. paraméterek.

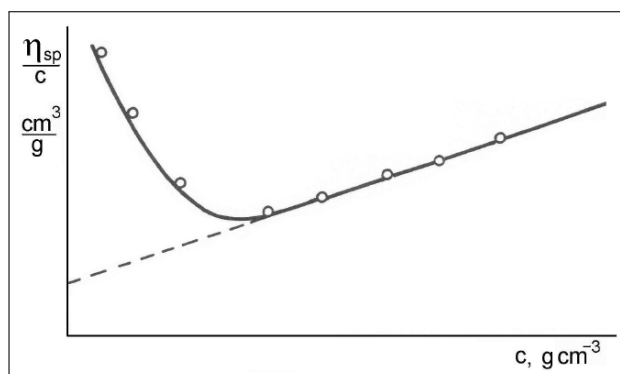
<sup>4</sup> Lásd pl. itt egyetemi IP címről: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlabk&AN=196653>.

<sup>5</sup> A görbe alacsony polimer koncentrációknál esetleg tapasztalható „abnormális” felhajlását a polimer – kapilláris falán történő adszorpciója okozza. Ez főleg a kisebb koncentrációknál okoz nagy eltérést, ahol kicsi a polimer oldat és a tiszta oldószer közötti viszkozitás- és átfolyási idő különbség.

1. táblázat. A Kuhn – Mark – Houwink-egyenlet állandói.

Polimer	Oldószer	T (°C)	$K_{\eta}(10^{-2})(\text{mL/g})$	a
Polietilén	Xilol	75	1,35	0,74
Poli-i-butilén	Benzol	24	8,30	0,50
Polisztirol	Benzol	25	1,03	0,74
Polisztirol	Toluol	30	1,20	0,72
PMMA	Metil-etil-keton	25	0,58	0,72
PMMA	Kloroform	25	0,34	0,83
PVA	Víz	25	4,28	0,64
PVA	30/70 V/V%-os n-PrOH-víz elegy	25	2,10	0,74
Epoxigyanta	Dioxán	25	3,98	0,61

A (13) egyenlet analóg az ozmometriánál ismert  $B/c = RT/M + Bc$  összefüggéssel, ahol a második viri-  
 álegyüttható szintén a szolvatációra jellemző és így kapcsolatos a viszkozitásmérésből számítható Huggins-  
 féle együtthatóval.



1. ábra. A határviszkozitás meghatározása grafikus extrapolációval.

### 1.3. Statisztikus gombolyag méretének számítása viszkozitásadatokból

Kísérleti tapasztalatok szerint a polimeroldatok tulajdonságait elsősorban a polimermolekula tömege, mérete és alakja határozza meg. Egy polimer molekula konformációs jellemzőit (alakját, méretét) oldott állapotban az adott kémiai szerkezet mellett a termodinamikai körülmények szabják meg. Így a molekula statisztikus méretét két faktor segítségével határozhatjuk meg. Az egyik fontos tényező az oldószer „jósága”, amely a szolvatáció folytán befolyásolja a gombolyag méretét. A másik pedig maga a polimerlánc szerkezeti felépítése. A lánc szerkezetétől és az oldószer természetétől függően a polimermolekula konformációs jellemzői eltérőek.

A határviszkozitás, a relatív molekulatömeg és a molekula mérete közötti általános összefüggés Kirkwood és Riseman szerint:

$$[\eta] = \frac{\Phi \cdot \langle h^2 \rangle^{3/2}}{M}, \quad (14)$$

ahol  $\langle h^2 \rangle^{1/2}$  a reális láncvégtávolság négyzetes átlagának négyzetgyöke (továbbiakban közepes hossz),  $\Phi$  pedig állandó. A (3) Flory-egyenlet felhasználásával

$$[\eta] = \frac{\Phi \cdot \langle h^2 \rangle_0^{3/2} \cdot \alpha^3}{M}. \quad (15)$$

A (15) összefüggésben az  $\alpha$  a Flory-féle expansziós faktor és  $\langle h^2 \rangle_0^{1/2}$  a perturbálatlan közepes hossz. Mivel  $\Theta$ -állapotban  $\alpha = 1$ , ezért

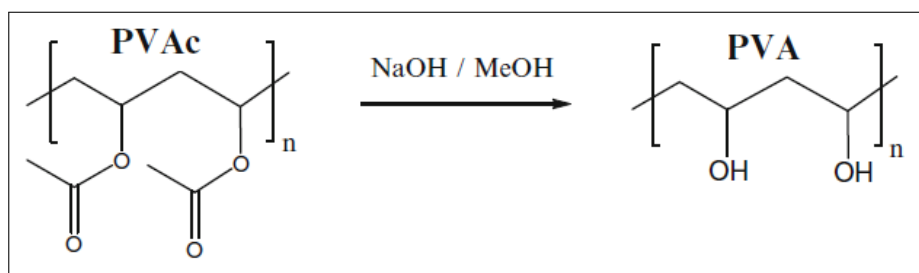
$$[\eta]_{\Theta} = \frac{\Phi \cdot \langle h^2 \rangle_0^{3/2}}{M}, \quad \text{illetve:} \quad (16)$$

$$\frac{[\eta]}{[\eta]_{\Theta}} = \alpha^3. \quad (17)$$

Ha tehát  $\Theta$ -állapotban meghatározzuk az  $[\eta]_{\Theta}$  határviszkozitást, akkor az adott oldószerre nézve kiszámíthatjuk az expansziós faktort. Az irodalmi adatok szerint a  $\Phi$  állandó értéke  $= 2,87 \cdot 10^{23} \text{ g}^{-1}$ , így a (14) és (16) egyenletek alapján kiszámíthatjuk a közepes hossz értékeit a különböző oldószerekben. Ezek az adatok értékes felvilágosítást adnak a polimermolekula oldatbeli állapotára.

## 1.4. A poli(vinil-alkohol) (PVA)

Szerkezetéből adódóan a poli(vinil-alkohol) egy vízben jól oldódó szintetikus polimer, amelyet iparilag a poli(vinil-acetát) (PVAc) lúgos hidrolízisével állítanak elő (2. ábra). A hidrolízis mértéke jelentősen befolyásolja az előállított polimer tulajdonságait. A teljesen hidrolizált PVA pl. hideg vízben is jól oldódik, de a hidrolízisfok csökkenésével a makromolekula vízdékonysága jelentősen csökken. A PVA kiváló filmképző, emulgeáló és adhezív tulajdonságokkal rendelkezik, szakítószilárdsága, rugalmassága magas. Előnyös tulajdonságainak köszönhetően széleskörűen használják a csomagolóiparban, mezőgazdaságban, textil- és papíriparban, ill. ragasztók alapanyagaként, de biokompatibilis tulajdonságainak köszönhetően a gyógyszeripar is jelentős mennyiséget használ fel.



2. ábra. PVA előállítása PVAc-ból.

## 2. A gyakorlat kivitelezése

- A mérés során a PVA polimer konformációs jellemzőit fogjuk meghatározni „jó oldószerben” (30 v/v% n-propanol + desztillált víz), illetve  $\theta$ -elegyben (45 v/v% n-propanol + desztillált víz) viszkozitásmérés segítségével.
- Ehhez a kiadott 10 %-os (10 g/100 mL) PVA vizes törzsoldat felhasználásával készíteni kell 30 – 30 mL 5 %-os PVA oldatot 30 v/v%-os propanol tartalommal (jó oldószer) és 5 %-os PVA oldatot 45 v/v%-os propanol tartalommal ( $\theta$ -elegy). Az oldatok elkészítése során először mindig a megfelelő mennyiségű, hígításhoz szükséges vizet adjuk hozzá a polimer oldathoz, majd homogenizálás után a propanolt, végül ezt is alaposan összekeverjük. *Az oldatok összemérésénél vegyük figyelembe a PVA törzsoldat víztartalmát is!*
- A PVA-t tartalmazó polimer oldatok mellett az ugyanilyen propanoltartalmú propanol / víz elegyeket is el kell készíteni a mérések kivitelezéséhez. Ezek térfogata 50 – 50 mL legyen.
- Az oldatok összemérése után az Ostwald-féle kapilláris viszkoziméterrel meghatározzuk az egyre nagyobb koncentrációval rendelkező polimeroldatok viszkozitását. A két különböző arányú oldószer

2. táblázat. A mérési eredmények összefoglalása.

$V_{\text{PVA oldat}} \text{ (mL)}$	$c_{\text{PVA}} \text{ (g/mL)}$	átfoly. idő (s)	$\eta_{\text{sp}}$	$\eta_{\text{sp}}/c \text{ (mL/g)}$	$\rho_g \text{ (g/mL)}$
0		$t_{0,\text{átl.}} =$	–	–	–
0,5					
1...					

elegyhez külön viszkozimétert használunk, a rövidebb átfolyási idővel rendelkező viszkozimétert választjuk a  $\theta$ -elegyek méréséhez.

- A mérések megkezdése előtt kiöntjük az Ostwald-féle kapilláris viszkoziméterekben található vizet és a készülékeket kétszer átmoszuk 2-3 mL tiszta eleggyel, majd – lehetőleg maradék nélkül – kiöntjük a folyadékot az eszközből.
- Ezt követően a tiszta oldószer elegyekből 10 mL-t pipetázunk a viszkoziméterek vastagabb szárába, majd a folyadékot felszívjuk úgy, hogy a folyadéknyívó az eszköz vékonyabbik szárán található felső jel fölé érjen. Ezt követően a két jel közötti (tehát azonos térfogatokhoz tartozó) átfolyási időket mérjük ( $t_0$ ). A mérést legalább egyszer megismételjük; túl nagy ( $>2-3$  s) eltérés esetén harmadszor is.
- Az oldatok mérése során 15 mL tiszta elegyet kipipetázunk főzőpohárba, majd ehhez 0,5 mL PVA oldatot adunk az ugyanilyen összetételű mintából és alaposan homogenizáljuk az új oldatot. Ezt követően 10 mL-nyi oldat felhasználásával meghatározzuk a minta átfolyási idejét ( $t_1$ ). A mérést követően az oldatot – lehetőleg maradék nélkül – visszaöntjük a főzőpohárba.
- Újabb 0,5 mL-nyi polimer oldat térfogatok hozzáadását követően a méréseket annyiszor ismételjük, hogy legalább 10–10 mérési pontunk legyen a jó oldószeres és a  $\theta$ -elegyes sorozatra is. *Az időtakarékosság érdekében a méréseket párhuzamosan végezzük a két eleggyel.*
- A mérések befejezése után az eszközöket legalább háromszor átmoszuk tiszta vízzel, majd a viszkozimétert vízzel töltjük fel.

### 3. A mérési eredmények kiértékelése

- Az oldatkészítés során alkalmazott térfogatok alapján mindkét sorozatra elkészítjük a 2. táblázatot. A minták specifikus viszkozitását ( $\eta_{\text{sp}}$ ) – az egyes oldatokra kapott átfolyási idők felhasználásával – a (12)-es egyenlet alapján határozzuk meg. A  $\rho_g$  gombolyagsűrűséget a (6) egyenlet alapján számoljuk, ahol  $\eta_{\text{rel}} = t/t_0$ .
- Ezt követően mindkét sorozat esetén ábrázoljuk az  $\eta_{\text{sp}}/c = f(c)$  függvényt és egyenes illesztéssel, ill. a (13)-as egyenlet segítségével meghatározzuk a két határviszkozitást ( $[\eta]$  és  $[\eta]_{\theta}$ ) a jegyzet 1. ábrája szerint (a hibákkal együtt).
- A (11) egyenlet alapján a „jó oldószeres” sorozatra kapott határviszkozitásból ( $[\eta]$ ) a Kuhn – Mark – Houwink-egyenlet alapján meghatározzuk a polimer relatív molekulatömegét ( $M$ ) majd a (14) egyenlet alapján a reális láncvégtávolság négyzetes átlagának négyzetgyökét ( $\langle h^2 \rangle^{1/2}$ ).
- Mindkét sorozat esetében ábrázoljuk a  $\rho_g$  gombolyagsűrűséget a polimer koncentrációjának függvényében. Adjunk magyarázatot az értékek alakulására.
- Végül a PVA expandáltságára jellemző Flory-féle expanziós faktor ( $\alpha$ ) értékét is megadjuk a (17) egyenlet alapján.
- Néhány mondatban értékeljük a kapott eredményeket, ill. azok elfogadhatóságát.

- A polimer molekulatömegének ( $M$ ), ill. az ismétlődő vinil-alkohol egységek molekulatömegének ( $M_0$ ) ismeretében adjuk meg a PVA polimer becsült polimerizáció fokát ( $P = M/M_0$ ), azaz a makromolekula láncban található ismétlődő egységek számát.
- A polimerizáció fok ismeretében, a C-C kötés 0,154 nm-es kötéshosszát figyelembe véve, valamint  $110^\circ$ -os kötésszöveget feltételezve, számoljuk ki a PVA láncmolekulák átlagos elméleti hosszát, ill. adjuk meg, hogy ez hányszor nagyobb, mint a polimer gombolyag mérete.

## Ellenőrző kérdések

1. Mitől függ a polimeroldatok viszkozitása?
2. Milyen konformációs jellemzők határozhatóak meg viszkozitásmérés alapján?
3. Írja fel és értelmezze a Kuhn-féle gyökös törvényt.
4. Írja fel és értelmezze a Kuhn-féle viszkozitástörvényt.
5. Írja fel és értelmezze a Kuhn – Mark – Houwink-egyenletet.
6. Írja fel és értelmezze a Huggins-egyenletet.
7. Írja le néhány mondatban, hogyan határozzuk meg az  $\alpha$  expanziós faktort viszkozitásmérés alapján.
8. Milyen paraméterek befolyásolják a makromolekulás gombolyag méretét?
9. Írja le néhány mondatban, hogyan határozzuk meg a statisztikus láncvégtávolságot viszkozitásmérés alapján.
10. Miért csak az  $[\eta]$  határviszkozitást használhatjuk fel viszkozimetriás molekulatömeg meghatározásra?