

**UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI**

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzikální chemie



**Studium zeta potenciálu polymerních  
vrstev s nanočásticemi stříbra**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval:

David Panáček

Studijní obor:

Nanomateriálová chemie

Vedoucí bakalářské práce:

doc.RNDr. Libor Kvítek, CSc.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana doc. RNDr. Libora Kvítka, CSc. Dále prohlašuji, že jsem veškeré použité podklady a literaturu uvedl v seznamu použité literatury.

V Olomouci dne .....

.....

Panáček David

## **Poděkování**

Své poděkování bych chtěl věnovat svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. RNDr. Liboru Kvítkovi, CSc. za odborné vedení a cenné připomínky. Další poděkování patří také pracovníkům Katedry fyzikální chemie za ochotu a pomoc při experimentálních měřeních.

Děkuji také svým rodičům za podporu, kterou mi poskytli během mého vysokoškolského života.

## Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora:	David Panáček
Název práce:	Studium zeta potenciálu polymerních vrstev s nanočásticemi stříbra
Typ práce:	Bakalářská
Pracoviště:	Katedra fyzikální chemie
Vedoucí práce:	Doc. RNDr. Libor Kvítek, CSc.
Rok obhajoby:	2016
Abstrakt:	<p>V této bakalářské práci byl sledován vliv hodnoty pH na zeta potenciál nanočástic stříbra stabilizovaných želatinou s cílem porovnání chování volných nanočástic v disperzi a vázaných v pevné vrstvě želatiny. V první fázi výzkumu byl sledován vliv pH na zeta potenciál vodné disperze nanočástic stříbra a v druhé fázi pak vliv pH na zeta potenciál želatinové vrstvy s obsahem nanočástic stříbra vytvrzené formaldehydem. Získané výsledky ukázaly na nepřenositelnost výsledků měření zeta potenciálu v kapalných disperzích na popis chování stejných nanočástic v obdobném prostředí ale v pevné fázi.</p>

Klíčová slova: zeta potenciál, disperze, vrstva, nanočástice  
stříbra, pH závislost, želatina

Počet stran: 44

Jazyk: čeština

## **Bibliographical identification**

Author's first name and Suriname:	David Panáček
Title:	The study of zeta potential of polymer layers with silver nanoparticles
Type of thesis:	Bachelor
Department:	Department of Physical Chemistry
Supervisor:	Doc. RNDr. Libor Kvítek, CSc.
The year of presentation:	2016
Abstract:	<p>This bachelor thesis is focused on the effect of pH on zeta potential of silver nanoparticles stabilized in gelatine with the objective to compare behaviour of free nanoparticles in dispersion and nanoparticles bound in solid layer of gelatine. In the first part of the research the effect of pH on zeta potential in aqueous dispersion of silver nanoparticles was studied and study of the effect of pH on zeta potential of gelatine layer containing silver nanoparticles hardened with formaldehyde was done in the second part. The study have shown that results from zeta potential measurements in aqueous dispersion are non-transferable for description of behaviour of the same nanoparticles in similar environment, but are possible to describe behaviour of nanoparticles in solid phase.</p>

Keywords: zeta potential, dispersion, layer, silver nanoparticles, pH dependence, gelatine

Number of pages: 44

Language: Czech

# Obsah

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2. TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
2.1 Koloidní soustavy.....	11
2.1.1 Dělení koloidních soustav.....	11
2.2 Kinetické vlastnosti koloidních soustav .....	12
2.2.1 Brownův pohyb.....	12
2.2.2 Difúze .....	13
2.2.3 Osmóza.....	13
2.2.4 Sedimentace .....	13
2.3 Optické vlastnosti koloidních soustav .....	14
2.3.1 Absorpce záření.....	14
2.3.2 Rozptyl záření .....	15
2.3.3 Dynamický rozptyl světla.....	16
2.3.4 Velikost částic na základě dynamického rozptylu světla .....	16
2.4 Elektrické vlastnosti koloidních soustav .....	17
2.4.1 Elektrická dvojrstva.....	17
2.4.2 Elektrokinetický potenciál .....	18
2.4.3 Elektrokinetické jevy .....	20
2.4.4 Měření zeta potenciálu .....	20
2.5 Stabilita koloidních soustav .....	21
2.5.1 Teorie DLVO .....	21
2.5.2 Sterická stabilizace .....	21
2.5.3 Stabilizace elektrickou dvojrstvou .....	22
2.6 Příprava koloidních soustav .....	22
2.6.1 Dispergační metody.....	22
2.6.2 Kondenzační metody .....	22
2.7 Želatina .....	23
2.7.1 Charakteristika želatiny .....	23
2.7.2 Výroba želatiny .....	23
2.7.3 Chemické vlastnosti želatiny.....	23
2.8 Nanočástice stříbra.....	24
2.8.1 Příprava nanočástic stříbra.....	25
2.8.2 Stabilizace želatinou.....	25
<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>26</b>
3.1 Chemikálie .....	26
3.2 Přístroje a vybavení.....	26
3.2.1 Spektrometr Specord S600.....	26
3.2.2 Přístroj na měření kontaktního úhlu.....	27
3.2.3 Zetasizer NanoZS .....	27
3.2.4 Příprava nanočástic stříbra.....	28
3.3 Postup pro stanovení zeta potenciálu v závislosti na pH ve vodné disperzi .....	29



3.4	Postup pro stanovení zeta potenciálu v závislosti na pH u nanosené vrstvy....	30
<b>4.</b>	<b>VÝSLEDKY .....</b>	<b>33</b>
4.1	Závislost zeta potenciálu vodné disperze nanočástic stříbra stabilizovaných želatinou na pH .....	33
4.2	Závislost zeta potenciálu želatinové vrstvy s obsahem nanočástic stříbra na pH36	
<b>5.</b>	<b>DISKUZE .....</b>	<b>40</b>
<b>6.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>42</b>
<b>7.</b>	<b>SUMMARY .....</b>	<b>43</b>
<b>8.</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>44</b>

# 1. ÚVOD

21. století se stává stoletím nanotechnologií, jejíž základy byly položeny ve druhé polovině 20. století takovými významnými vědci jako byl R. Feynman. Nanomateriály se stávají už běžnou součástí našich životů, typicky nanočástice stříbra, které díky svým biologickým vlastnostem vykazují vysokou antibakteriální aktivitu a tím patří aktuálně mezi nejstudovanější nanomateriály v praxi.

I když se výzkum nanočástic začal vyvíjet jako samostatný obor v nedávné době, zmínky o jejich přípravě a využití jsou známy už dávno. Například staří Číňané psali velice stálou tuš, která byla tvořena koloidní disperzí sazí stabilizovanou želatinou. Dále staří Egypťané používali různě barevné inkousty, které představovaly disperze všelijakých zemin a minerálů ve vodě.<sup>1</sup>

Nanočástice stříbra (nebo spíše koloidní částice stříbra) byly využívány dříve kvůli jejich antibakteriálním účinkům, jakmile ale byly objeveny antibiotika (penicilin v první polovině 20. stol.), stříbro jako antibakteriální prostředek ustoupilo do pozadí. Ale později se zjistilo, že bakterie mohou být odolné vůči penicilinovým antibiotikům a díky tomu se opět obnovil zájem o výzkum nanočástic stříbra v souvislosti s jejich aktivitou vůči těmto rezistentním bakteriím.<sup>2</sup> Jsou i další příčiny, kvůli kterým se zvyšuje zájem o nanočástice stříbra. Je to například jejich využitelnost v povrchem zesíleném Ramanově rozptylu, který může za rozvoj nové vysoko citlivé spektroskopické metody SERS (Surface Enhanced Raman Spectroscopy).<sup>3</sup>

Elektrické vlastnosti nanočástic, zejména jejich elektrický náboj hrají zásadní roli nejen v jejich stabilitě, ale i v jejich využitelnosti v praktických aplikacích. Znalost zeta potenciálu, který souvisí s nábojem na povrchu částice a kterým se zabývám ve své bakalářské práci, je důležitá nejen kvůli tomu, že zeta potenciál určuje, zda částice budou mít tendenci k agregaci, ale i jak budou interagovat s jinými částicemi přítomnými v disperzi. Znalost tohoto potenciálu je proto užitečná v mnoho průmyslových odvětví jako je např. keramický průmysl, ve kterém je důležitá vysoká hodnota zeta potenciálu. Důvod je takový, že vysokou hodnotou zeta potenciálu se zajistí silné zahuštění keramických částic a tím se konečnému výrobku přidá dostatečná pevnost. Dále znalost zeta potenciálu se používá například při přípravě emulzí, protože hlavně na něm závisí zda emulze zůstane stabilní v prostředí, ve kterém se bude využívat.<sup>15</sup>

Měření zeta potenciálu volných částic v disperzi je již dobře zvládnutý experiment, podpořený řadou komerčně dostupných přístrojů. Ovšem studium zeta potenciálu vrstev na povrchu tuhé fáze s obsahem nanočástic je v současnosti velmi nové téma a i podpora ze strany přístrojové techniky pro toto měření je minimální. Studium zeta potenciálu vrstev s obsahem nanočástic stříbra se tak stalo základním tématem této bakalářské práce.

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

Polymerní i nanočásticové systémy představují specifickou formu hmotných objektů, studovaných v přírodovědných oborech i využívaných v průmyslové praxi. Obecně je chování těchto atypických soustav odlišné od chování hmoty v makroskopickém uspořádání, a proto se jejich studiem zabývá samostatný vědní obor – koloidní chemie.

### 2.1 Koloidní soustavy

Koloidní soustavy jsou jedním ze tří základních možností uspořádání tzv. disperzních soustav, které jsou složeny ze dvou základních částí: disperzní fáze a disperzního prostředí. Disperzní prostředí tvoří spojitou část disperzní soustavy, ve které je rovnoměrně rozptýlená disperzní fáze. Jestliže disperzní soustava obsahuje dvě složky, ale jen jednu fázi, tak tato soustava je homogenní. Složka, která tvoří disperzní fázi, je ve složce tvořící disperzní prostředí rozptýlena v tak drobných částicích, že se nedá uvažovat o rozhraní mezi částicemi a disperzním prostředím. Naopak jestliže disperzní soustava obsahuje dvě fáze, kde jedna tvoří disperzní fázi a druhá disperzní prostředí, tak tuto soustavu nazýváme heterogenní. V tomto případě mezi částicemi dispergované fáze a prostředím, které ji obklopuje, existuje určitá hranice – fázové rozhraní, které zásadně ovlivňuje chování celé soustavy - koloidní disperze. Koloidní disperze je soustava s velikostí částic v rozmezí  $10^{-9} - 10^{-6}$  m. Disperze obsahující částice v tomto rozmezí velikostí udělují systému specifické vlastnosti, které analytické disperze nemají, koloidy typicky rozptylují světlo.<sup>4</sup>

#### 2.1.1 Dělení koloidních soustav

Vzhledem k rozmanitosti můžeme koloidní soustavy rozdělit do více tříd podle mnoha kritérií. Například podle tvaru nebo velikosti dispergovaných částic anebo podle skupenství disperzního prostředí a disperzní fáze. Částice disperzní fáze mohou mít různou velikost. Takovou velikost vyjadřujeme stupněm disperzity, což je převrácená hodnota lineárního rozměru částice.<sup>4</sup>

Jestli všechny částice disperzní fáze mají stejnou velikost, tak taková soustava je monodisperzní. Jestliže v soustavě mají částice odlišnou velikost, řadíme je mezi polydisperzní. Homodisperzní soustavy obsahují částice se stejným tvarem a soustavy s částicemi odlišného tvaru jsou heterodisperzní.<sup>4</sup>

Částice anebo soustavy lze dělit podle tvaru na laminární, korpuskulární a fibriálně disperzní. Laminární částice mají tvar destiček. Korpuskulární jsou ve všech třech rozměrech mikrodisperzní. Fibrilární částice zaujímají tvar buď tyčinek nebo vláken (jeden rozměr mikrodisperzní).<sup>4</sup>

Další dělení koloidních soustav lze provést podle skupenství disperzní fáze a disperzního prostředí.

**Tabulka 1:** Rozdělení koloidních soustav podle skupenství disperzní fáze a disperzního prostředí.<sup>6</sup>

<b>Disperzní prostředí</b>	<b>Disperzní fáze</b>	<b>Označení koloidní disperze</b>
Pevné	pevná	tuhé soly
	kapalná	tuhé emulze
	plynná	tuhé pěny
Kapalné	pevná	lyosoly
	kapalná	emulze
	plynná	pěny
plynné	pevná	aerosoly
	kapalná	aerosoly
	plynná	netvořící koloid

Koloidní soustavy, které jsou tvořené kapalným disperzním prostředím a pevnou disperzní fází, lze rozdělit podle vlastností fázového rozhraní na lyofobní, lyofilní a asociativní koloidy.

Lyofobní koloidy se vyznačují ostře vymezeným fázovým rozhraním, které nevzniká samovolně, ale umělým rozptýlením nebo srážecími reakcemi. Lyofobní koloidy jsou většinou tvořeny anorganickými látkami a jsou termodynamicky nestálé.

Lyofilní soustavy zase zahrnují vysoký stupeň příbuznosti disperzní fáze a disperzního prostředí.<sup>4</sup> Mnohdy jsou nazývány také jako koloidní roztoky.

Asociativní koloidní částice vznikají spojením molekul povrchově aktivních látek do větších útvarů- micely.<sup>4</sup>

## **2.2 Kinetické vlastnosti koloidních soustav**

### **2.2.1 Brownův pohyb**

V roce 1827 byl objeven tepelný pohyb částic v mikroheterogenních a koloidních systémech vodné suspenze na základě pozorování květního pylu. Tento pohyb byl pojmenován podle objevitele jako Brownův pohyb.<sup>5</sup>

S větší intenzitou při vyšší teplotě se budou pohybovat částice menších rozměrů kvůli tomu, že s rostoucí hmotností a velikostí roste také pravděpodobnost kompenzace nárazů a moment setrvačnosti částic. U částic jejichž průměr je kolem 5  $\mu\text{m}$  je možno pozorovat pouze vibrace, je-li rozměr částic větší, Brownův pohyb nevykonávají.<sup>6</sup>

### 2.2.2 Difúze

Je samovolný pohyb molekul, iontů nebo koloidních částic ve směru klesajícího gradientu koncentrace. Tento děj je způsoben Brownovým pohybem a pokračuje až do vyrovnání koncentrace.<sup>6</sup>

Zákon popisující tento děj se nazývá *I. Fickův zákon*:

**Rovnice 1:** *Fickův zákon*

$$\frac{dn}{dt} = -SD \frac{dc}{dx}$$

kde S je plocha kolmá na směr difúze, D je difúzní koeficient [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ],  $dn/dt$  je látkové množství difundující látky v čase a  $dc/dx$  je koncentrační gradient.

I. Fickův zákon platí pouze v případě, že  $dc/dx$  není závislé na čase, v tomto případě se jedná o tzv. stacionární difúzi.<sup>7</sup>

### 2.2.3 Osmóza

Při průchodu částice disperzního prostředí přes semipermeabilní (polopropustnou) membránu mezi dvěma disperzemi s různou koncentrací, dochází k toku rozpouštědla z místa s nižší koncentrací do místa s vyšší koncentrací částic. Hnací silou tohoto děje je snaha o vyrovnání chemického potenciálu prostředí na obou stranách membrány. Síla takového pohybu se značí jako osmotický tlak  $\pi$ . Působí-li na systém, který je oddělený semipermeabilní membránou od čistého rozpouštědla tlak větší než rovnovážný osmotický tlak, molekuly rozpouštědla se pohybují opačným směrem než při osmóze, takový děj nazýváme reverzní osmóza.

Osmotický tlak u látek nízkomolekulárních popisuje van't Hoffova rovnice:

**Rovnice 2:** van't Hoffova rovnice

$$\pi = c_2 \cdot RT$$

kde  $c_2$  je látková koncentrace složky (v jednotkách  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$ ), která neprochází membránou a R pak je univerzální plynová konstanta.<sup>1</sup>

### 2.2.4 Sedimentace

Jev, při kterém se koloidní částice vlivem působení gravitační síly  $F_g$  pohybují směrem působení síly. Jak se budou částice pohybovat, závisí jednak na hmotnosti, dále

na tvaru a hustotě částic. Dalším faktorem ovlivňující pohyb je viskozita prostředí, ve kterém se částice pohybují.

Proti každé částici kulového tvaru, která se pohybuje v kapalině vlivem gravitační síly  $F_g$  působí vztlaková síla  $F_{vztl}$  a viskózní odpor  $F_{vis}$ , který lze vyjádřit *Stokesovým vztahem*:<sup>9</sup>

**Rovnice 3:** Stokesův vztah

$$\mathbf{F}_g = \mathbf{F}_{vztl} + \mathbf{F}_{vis}$$

Gravitační sílu lze s ohledem na vztlakovou sílu vyjádřit vztahem:<sup>4</sup>

**Rovnice 4:**

$$\mathbf{F}_g = \pi r^3 (\rho - \rho_0) \mathbf{g}$$

kde  $g$  je gravitační zrychlení a  $\rho$  a  $\rho_0$  jsou hustoty částice a disperzního prostředí.

Proti pohybu částic nacházejících se ve viskózním prostředí působí síla viskózního odporu  $F_\eta$  definovaná *Stokesovým zákonem*:<sup>5</sup>

**Rovnice 5:**

$$\mathbf{F}_\eta = \mathbf{Bv} = 6\pi\eta r \mathbf{v}$$

kde  $B$  je koeficient tření částic,  $\eta$  je viskozita disperzního prostředí a  $v$  je rychlost pohybu.

## 2.3 Optické vlastnosti koloidních soustav

Popisování optických vlastností koloidních soustav je složitou záležitostí. Jakmile dopadá světelný paprsek (elektromagnetické záření) na koloidní soustavu, dochází jak k absorpci záření, tak i k rozptylu dopadajícího záření. Podle toho jaký charakter má koloidní soustava (chemické složení disperzní fáze, velikost částic) dochází k tomu, že jeden z jevů převládá.<sup>4</sup>

### 2.3.1 Absorpce záření

Při absorpci záření dochází k pohlcení kvanta energie elektromagnetického záření hmotou. Toto vede ke změně energetických stavů valenčních a vazebných elektronů. Při

absorpci záření dojde k nárůstu vnitřní energie molekul systému, která se mění v energii tepelnou.

Děj, při kterém nějaká látka absorbuje světelné záření, vystihuje Lambert-Beerův zákon:<sup>8</sup>

**Rovnice 6:** Lambert- Beerův zákon

$$A = -\log \frac{I}{I_0} = \epsilon cd$$

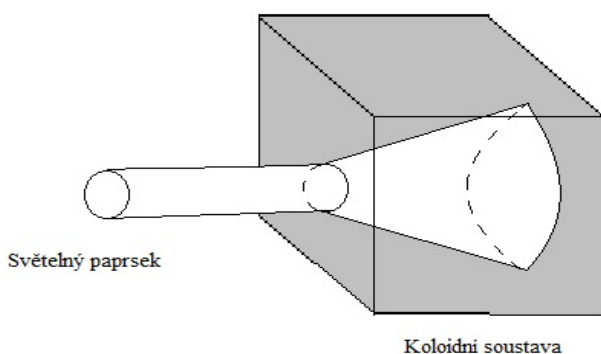
kde  $I$  je intenzita prošlého záření látkou,  $I_0$  je intenzita dopadajícího světla na látku,  $\epsilon$  je absorpční koeficient,  $c$  je koncentrace absorbující látky,  $d$  je tloušťka vrstvy a  $A$  je veličina absorbance.

Tento zákon je u koloidních soustav zkomplikovaný závislostí absorpce záření na velikosti částic disperzní fáze.<sup>4</sup>

Kovové nanočástice absorbují specificky světlo o konkrétní vlnové délce, související s oscilacemi elektronů ve vodivostním pásu velmi malé částice – tento jev nazýváme jako povrchový plazmon.<sup>9</sup>

### 2.3.2 Rozptyl záření

Při průchodu světelného paprsku skrze koloidní disperzi dochází k rozptylu světla. Všechny takové soustavy vykazují tzv. Tyndallův efekt (rozptyl paprsku světla do kužele).



Obrázek 1: Tyndallův jev.

K znázornění rozptylu světla v disperzních soustavách se využívají Mieovy vektorové diagramy. V diagramu jsou vyznačeny veličiny jako je intenzita polarizovaného a nepolarizovaného světla v podobě radiusvektorů směřujících do všech stran od bodu zobrazujícího částici.<sup>6</sup>

Pro popis rozptylu světla byla Rayleighem vypracována teorie, která byla použitelná jen pro částice malých rozměrů, které musí být od sebe s dostatečnou vzdáleností a nevykazují vlastní absorpci záření.

Podle této teorie byl odvozen vztah intenzity rozptýleného záření vertikálně polarizované složky světla:<sup>7</sup>

**Rovnice 7:**

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_V = \frac{16\pi^4 R^6}{r^2 \lambda^4} \cdot \left(\frac{n_{rel}^2 - 1}{n_{rel}^2 + 2}\right)^2$$

kde R je poloměr částice, r vzdálenost detektoru,  $\lambda$  je vlnová délka původního i rozptýleného záření v disperzním prostředí a  $n_{rel}$  je relativní index lomu.

Horizontální složku polarizovaného světla, které je závislé na směru pozorování popisuje rovnice:<sup>6</sup>

**Rovnice 8:**

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_V = \frac{16\pi^4 R^6}{r^2 \lambda^4} \cdot \left(\frac{n_{rel}^2 - 1}{n_{rel}^2 + 2}\right)^2 (\cos^2 \theta)$$

### 2.3.3 Dynamický rozptyl světla

Dynamický rozptyl světla ( DLS- Dynamic Light Scattering), také nazývaný jako kvazielastický rozptyl světla, je metoda vhodná pro měření velikosti částic v submikronové oblasti. Základem této techniky je měření fluktuace intenzity rozptýleného světla z laserového zdroje okolo její průměrné hodnoty. Tyto fluktuace souvisí s interferenčním zeslabováním a zesilováním světla rozptýleného na nestacionárních částicích disperzní fáze, podléhajících Brownovu pohybu. Čím rychleji se částice pohybují, tím rychleji se intenzita rozptýleného světla mění. Rychlost těchto změn je tedy přímo závislá na pohybu molekuly.<sup>28</sup>

### 2.3.4 Velikost částic na základě dynamického rozptylu světla

Velikost částice měřená pomocí dynamického rozptylu světla vychází z průměru koule, která difunduje stejnou rychlostí, jako měřená částice. Velikost se stanovuje nejprve tak, že se změní Brownův pohyb částic ve vzorku s použitím dynamického rozptylu světla, a potom je z něj na základě Einsteinovy rovnice spočtena velikost částice. Je známo, že malé částice se v kapalině pohybují rychle, a velké zase pomalu. Tento



pohyb probíhá neustále, takže jestliže vezmeme v potaz dva systémy s různou velikostí částic, pozorujeme na časové škále jejich pohyb, přesněji o kolik se částice přesunula. Tudiž lze vypočítat, jak velká částice je. Jestliže došlo k minimálnímu pohybu a polohy částic jsou velmi podobné, pak budou částice ve vzorku velké; podobně, jestliže došlo k velkému pohybu a polohy částic jsou zcela rozdílné, pak částice ve vzorku jsou malé.<sup>15</sup>

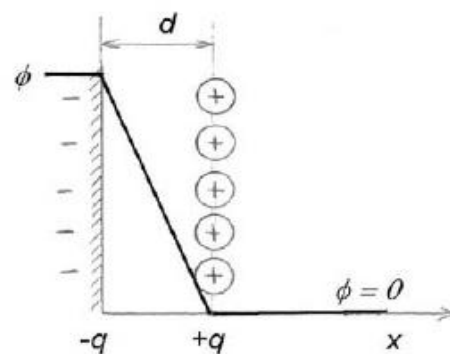
## 2.4 Elektrické vlastnosti koloidních soustav

V mnoha koloidních systémech s vodným prostředím nese fázové rozhraní elektrický náboj, jehož význam je hlavně ve stabilitě těchto systémů.<sup>5</sup>

### 2.4.1 Elektrická dvojvrstva

Je-li ve styku nabitý povrch částice s ionty roztoku, dochází k přitahování iontů opačného znaménka. Náboje těchto iontů neutralizuje náboj povrchu a vzniká jakýsi útvar, který je tvořen dvěma vrstvami. Tyto vrstvy jsou opačně nabitě a tvoří tzv. elektrickou dvojvrstvu. Mezi nabitým povrchem a objemovou fází roztoku je rozdíl elektrických potenciálů. Vnitřní část dvojvrstvy se značí jako vnitřní vrstva nebo nabitý povrch. Tato vrstva je buď součástí tuhé fáze, nebo tvoří na povrchu adsorbovanou vrstvu o tloušťce jednoho iontu. Lze ji považovat za plochu, která nese elektrický náboj  $Q_0$ . Náboj vztažený na jednotku plochy povrchu nazýváme jako plošná hustota náboje:  $\sigma_0 = Q_0/A$ . Vnitřní vrstva přitahující opačné ionty roztoku vytváří druhou vrstvu o stejné plošné hustotě náboje, ale s opačným znaménkem – vnější vrstvu. Vnější vrstva je k vnitřní vrstvě vázána jednak elektrickými tak i adsorpčními silami.<sup>1</sup>

Elektrickou dvojvrstvu velmi zjednodušeně popisuje tzv. Helmholtzův model:

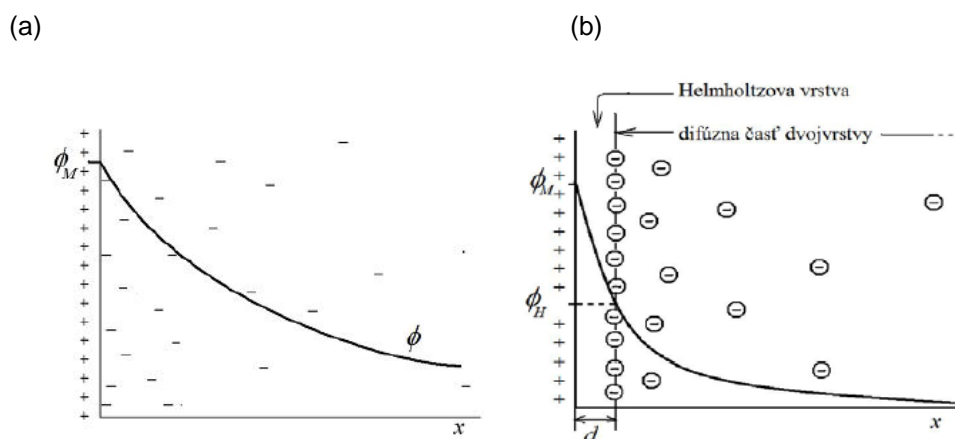


**Obrázek 2:** Helmholtzův model elektrické dvojvrstvy s lineárním průběhem potenciálu.<sup>13</sup>

Teorie elektrické dvojvrstvy byla rozvinuta kolem roku 1910, kdy se bral v potaz také vliv tepelného pohybu iontů na rozdělení nábojů takové části dvojvrstvy, která je na straně roztoku.<sup>13</sup>

Další rozvinutí teorie elektrické dvojvrstvy vycházelo z úvah, ve kterých se brala v úvahu teplota roztoku na hodnotě absolutní nuly ( $T=0K$ ). V takovém případě by přestal tepelný pohyb iontů a ionty by se uspořádaly podle Helmholtzova modelu. Jestliže teplota roztoku stoupne, tak část iontů odchází do difúzní části dvojvrstvy. A náboj v roztoku  $q_s$ ,

který kompenzuje náboj  $q_M$  na elektrodě se díky tomuto rozdělí na dvě části: vnitřní a difúzní.<sup>13</sup>



**Obrázek 3:** Porovnání modelu elektrické dvojvrstvy a průběh potenciálu podle (a) Gouy a Chapmanovy teorie a (b) Sternovy teorie.

U velkého zředění roste význam difúzní části dvojvrstvy. Stav difúzní vrstvy je dán rovnováhou mezi elektrostatickými silami a tepelným pohybem iontů. Koncentrace iontů v této vrstvě klesá se vzdáleností od nabitého povrchu.<sup>1</sup>

## 2.4.2 Elektrokinetický potenciál

Většina kapalin obsahuje nějaké ionty, ty jsou jednak záporně nabitě anebo kladně nabitě, anionty resp. kationty. Když je nabitá částice obsažena v kapalině, dochází k tomu, že ionty s opačným nábojem než je náboj částice v kapalině, jsou přitahovány k povrchu suspendované částice.

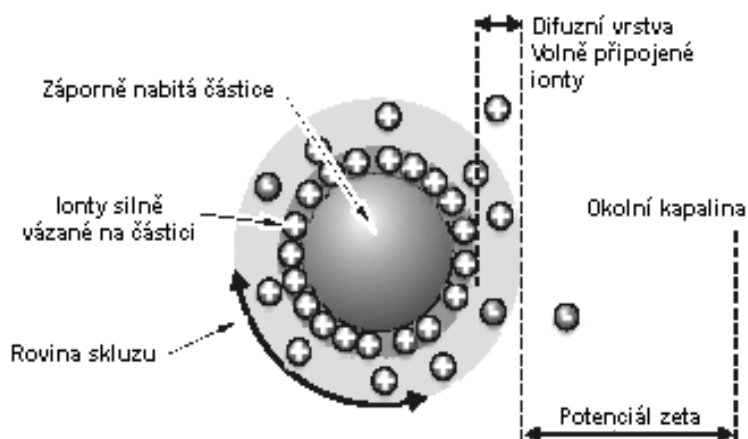
Částice se záporným nábojem bude přitahovat kladně nabitě ionty z kapaliny a obráceně.

Ionty, které se vyskytují blíže povrchu částice, se vážou silně. Kdežto ionty, které jsou vzdálenější, se budou vázat volněji a budou vytvářet tzv. difúzní vrstvu.

Uvnitř difúzní vrstvy je jakási pomyslná hranice, kdy ionty uvnitř této hranice se pohybují s částicí, při jejím pohybu v kapalině. Na druhou stranu jsou některé ionty vně této hranice, které se nepohybují a zůstávají na původním místě - tato hranice se nazývá rovina skluzu (Slipping plane) nebo též pohybové rozhraní.

Mezi povrchem částice a kapalinou existuje potenciál, který se mění podle vzdálenosti od povrchu částice. Tento potenciál na rovině skluzu se označuje jako elektrokinetický a značí se řeckým písmenem  $\zeta$ , proto Zeta-potenciál.<sup>15</sup>

**Obrázek 4:** Zeta potenciál nabitě částice v kapalině.<sup>15</sup>



Při studiu zeta potenciálu je důležité se zabývat faktory, které zásadně tento potenciál ovlivňují. Je to například změna koncentrace roztoku, přidavek elektrolytu nebo hodnota pH.

Jeden z těch důležitějších faktorů ovlivňující zeta potenciál je pH. Hodnota pH se zvyšuje přidavkem zásady, přičemž povrch zůstane negativní, nebo bude méně pozitivní. V případě, kdy se přidá kyselina, dojde ke ztrátě hydroxidových iontů a tím se stane povrch více pozitivním.<sup>16</sup>

Koncentrace koloidní soustavy ovlivňuje zeta potenciál tak, že při ředění systému se potenciál zvyšuje. To je dáno tím, že se tloušťka elektrické dvojvrstvy vlivem poklesu koncentrace protiiontů v roztoku zvětšuje.<sup>6</sup>

Děj, při kterém je koloidní soustava nejméně stabilní nastává tehdy, kdy je zeta potenciál nulový tzv. izoelektrický bod.<sup>16</sup>

### 2.4.3 Elektrokinetické jevy

Při relativním pohybu pevné fáze s elektrickou dvojrstvou vůči roztoku dochází k elektrokinetickým jevům, jako jsou: 1. Elektroforéza

2. Elektroosmóza
3. Sedimentační potenciál
4. Potenciál proudění

Při relativním pohybu tuhé fáze s elektrickou dvojrstvou proti roztoku dochází k tomu, že se elektrická dvojrstva ocitne v oblasti rychlostního gradientu, což je základní princip elektrokinetických jevů.<sup>1</sup>

Nachází-li se disperzní systém v elektrickém poli, dochází k tomu, že částice disperzní fáze se pohybuje k jedné elektrodě a zbytek difúzní vrstvy k elektrodě druhé. Tento děj se nazývá elektroforéza.<sup>1</sup> Pro změnu při sedimentaci dochází u elektricky nabitých částic ke vzniku elektrického potenciálového rozdílu mezi elektrodami nacházejícími se v různé výšce sloupce sedimentujících částic, což je sedimentační potenciál.<sup>4</sup>

Elektroosmóza je průtok kapaliny kapilárou anebo soustavou kapilár, který je vyvolán potenciálovým spádem. Rychlost, kterou elektroosmotický tok proudí, je závislý na vlastnostech elektrické dvojrstvy. Pro množství elektrokineticky převedené kapaliny platí tento vztah:<sup>14</sup>

**Rovnice 9:**

$$\dot{V} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \xi I}{\eta \kappa} \quad \text{kde } I \text{ je proud, } \kappa \text{ je konduktivita a } \eta \text{ je viskozita kapaliny.}$$

Jestliže dochází působením tlaku k průtoku disperzního systému kapilárou anebo soustavou kapilár, ustanovuje se mezi oběma konci kapiláry rozdíl elektrických potenciálů, který se nazývá potenciál proudění. Velikost potenciálového rozdílu je popsána vztahem:<sup>1</sup>

**Rovnice 10:**

$$U_p = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \xi p}{\eta \kappa}$$

kde  $p$  je rozdíl tlaků vyvolávajících proudění kapaliny.

### 2.4.4 Měření zeta potenciálu

Zeta potenciál se měří s použitím kombinace technik měření: Elektroforéza a Laserová Dopplerova velocimetrie, někdy nazývaná Laserová Dopplerova elektroforéza. Tato metoda měří, jak rychle se částice pohybuje v kapalině, pod vlivem elektrického

pole. Jakmile známe rychlost částice a aplikované elektrické pole, můžeme s použitím dvou dalších známých konstant vzorku- viskozity a dielektrické konstanty - vypočítat zeta potenciál.<sup>15</sup>

## 2.5 Stabilita koloidních soustav

Stálost disperzních soustav se pohybuje v širokém rozmezí, od úplné nestability až skoro po úplnou stálost. Při stabilitě disperzních soustav se posuzuje termodynamická stabilita a kinetická stabilita. Kinetická stabilita je děj, při kterém si systém zachovává rozdělení koncentrace částic v gravitačním poli. Agregátní stabilita pak souvisí s termodynamickou stabilitou - je to nějaká stálost, kdy si systém zachovává daný stupeň disperzity. Systémy, které obsahují velké částice, jeví kinetickou nestabilitu. Čím jsou částice menší, tím více se uplatňuje agregátní nestabilita.<sup>17</sup>

### 2.5.1 Teorie DLVO

V této teorii jde o fyzikální popis koagulace, který je založený na předpokladu, že celková interakce mezi koloidními částicemi je určena jak odpuzivými elektrostatistickými interakcemi mezi nimi, tak i mezimolekulovými přitažlivými silami.<sup>18</sup>

Tato teorie rozlišuje tzv. neutralizační koagulaci, která souvisí s adsorpčními jevy a koncentrační koagulací, která vzniká stlačením elektrické dvojvrstvy v okamžiku přidání dostačujícího množství elektrolytu, kdy se sníží zeta potenciál koloidních částic.

Ke koncentrační koagulaci dochází jen tehdy, kdy je dosaženo koagulačního prahu  $\gamma$ :<sup>4</sup>

**Rovnice 11:**

$$\gamma = C \frac{4\pi\epsilon(kT)^5}{A^2 e^6 z^6} \quad \text{kde } e \text{ je elementární náboj a } z \text{ nábojové číslo protiontu.}$$

U neutralizační koagulace jde o množství naadsorbovaných iontů na povrchu částice, která popisuje velikost náboje povrchu a tím odpovídající elektrický potenciál  $\varphi$ . Zmenšení elektrického potenciálu je způsobeno adsorpcí iontů, což vede ke snížení velikosti odpuzivých sil. Tímhle jevem může docházet ke spojení částic a následné koagulaci.<sup>19</sup>

### 2.5.2 Sterická stabilizace

Látky, které jsou rozpustné v disperzním prostředí a také jsou schopny dostatečně velké adsorpce na povrch lyofobních částic, zprostředkovávají sterickou stabilizaci. Tímto faktem dochází k tomu, že lyofobní částice jsou stabilnější, nepodléhají koagulaci

a získají lyofilní povrch. Pro sterickou stabilizaci se využívají povrchově aktivní látky, které tvoří asociativní koloidy a některé makromolekuly.<sup>17</sup>

### 2.5.3 Stabilizace elektrickou dvojrůstvou

Princip této stabilizace je v elektrické dvojrůstvě tvořené okolo částic, které mají povrch elektricky nabitý a tím jsou schopny přitahovat ionty opačného náboje. Při pohybu částice se váže část náboje s opačným znaménkem ve vnější difúzní vrstvě tak, že se tato částice projevuje jako elektricky nabitá. Všechny částice náležící stejné látce v tom samém disperzním prostředí mají stejný náboj a díky tomu se při vzájemné srážce uplatní proti adhezním silám odtažené elektrostatische síly. Což vede k tomu, že se částice od sebe znovu oddálí a ke spojení nedochází.<sup>17</sup>

## 2.6 Příprava koloidních soustav

Pro přípravu koloidních soustav existují dva poměrně dost rozdílné způsoby - na jedné straně to jsou dispergační metody, při kterých se makroskopické látky rozpadají na částice koloidních rozměrů a straně druhé jsou to kondenzační metody, u kterých dochází ke vzniku molekulárních agregátů koloidní velikosti.<sup>20</sup>

### 2.6.1 Dispergační metody

U dispergačních metod se koloidní soustavy získávají například laserovou ablací, mletím nebo elektrickým rozprašováním. Praktické uplatnění má rozptýlení v elektrickém oblouku a laserová ablace.<sup>21</sup>

### 2.6.2 Kondenzační metody

Tyto metody se rozdělují do dvou skupin a to na fyzikální a chemické. U fyzikálně kondenzačních postupů se bere v potaz změna rozpustnosti látek, při kterých vlivem změny rozpouštědla dochází ke kondenzaci látky za vzniku koloidních částic.<sup>4</sup>

Příprava stříbrných nanočástic cestou chemických metod je v dnešní době nejčastější. Chemické metody jsou založeny na redukci stříbrné soli. Na redukci se využívají činidla jak anorganická, jako je například tetrahydridoboritan sodný, hydrazin nebo peroxid vodíku, tak i redukční činidla organická, mezi ně patří citrát sodný, kyselina askorbová anebo redukující cukry.

Vlivem silného redukčního činidla, kterým je například tetrahydridoboritan sodný vznikají malé monodisperzní částice. Citrát jakožto zástupce slabšího redukčního činidla způsobuje tvorbu větších polydisperzních částic.<sup>22 23</sup>

V dnešní době se stále častěji využívá řízená syntéza pomocí Tollensovy metody, která je založena na redukci stříbrného amoniakálního roztoku glukosou.<sup>23</sup>

## 2.7 Želatina

### 2.7.1 Charakteristika želatiny

Želatina je velmi čistý a jemný kliš, který se získává vyvařením šlach, kůží, kostí nejčastěji ze skotu a jiných jatečných odpadů bohatých na kolagen. Prekursorem želatiny je tedy kolagen, tvořící důležitou část pojivé tkáně živočichů a vyskytuje se téměř ve všech tkáních organismu.<sup>24</sup>

### 2.7.2 Výroba želatiny

Výroba želatiny je založena na čtyřech stádiích.

#### 1. Příprava suroviny.

Účelem je co nejúplnější oddělení doprovodných látek (především tuků, minerálních látek) od kolagenu praním suroviny ve vodě a roztocích s přídavkem soli nebo pufru.

#### 2. Příprava pro extrakci.

Jednotlivé postupy je možno rozdělit do 2 základních skupin, které jsou označovány jako kyselý nebo alkalický proces. Zásah do molekuly kolagenu kyselinou nebo zásadou ovlivní odlišným způsobem vlastnosti finálního produktu.

Kyselý postup vyžaduje dosažení hodnot pH v rozmezí 3,5 až 4,5 při teplotě 15-20° C. Doba působení kyseliny se řídí druhem a stářím suroviny. Tímto způsobem dochází k nedostatečnému odstranění především mukopolysacharidů při snaze neovlivnit primární strukturu proteinu.

Alkalický postup využívá zpravidla výhodných vlastností suspenze hydroxidu vápenatého, někdy s přídavkem nebo úplnou náhradou jinými hydroxidy.

#### 3. Extrakce želatiny.

Provádí se většinou diskontinuálním působením vhodného prostředí o neutrálním nebo slabě kyselém pH. Teplota několika oddělených frakcí extrakčního činidla bývá postupně zvyšována v krocích od 50°C až do bodu varu.

#### 4. Další zpracování želatiny.

Roztok želatiny je dále čištěn. Tuk je odstraňován odvrstvením pomocí centrifugy. Mechanické znečištění se odstraňuje filtrací. Některé speciální želatiny se dále bělí, protřepávají s adsorpčním uhlím.<sup>24</sup>

### 2.7.3 Chemické vlastnosti želatiny

Sestava aminokyselin želatiny jako bílkoviny má určité specifické rysy. Značný podíl v molekule želatiny, pocházející ze savců tvoří glycin (asi 1/3), prolin (asi 13%),

hydroxyprolin (asi 10%), alanin (asi 10%). Tryptofan a aminokyseliny, obsahující síru zcela chybí. Jako znečištěniny jsou v želatině prokazovány mukopolysacharidy, glykoproteiny, lipidy a nukleové kyseliny, které jsou nežádoucí především ve fotografické želatině. Alkalickým předzpracováním dochází ke ztrátám amidického dusíku postranních skupin asparaginu a glutaminu.

Vzájemná afinita nepolárních oblastí v sekvenci aminokyselin (daná především tripletem – Gly-Pro-Hyp-) je podstatou tvorby levotočivé šroubovice. Vždy 3 polypeptidové šroubovice jsou ještě stočeny kolem společné osy v mírně pravotočivou superhelix, dávající molekulovou hmotnost 300 000, nazývanou tropokolagen. Jednotlivé polypeptidové řetězce jsou v tropokolagenu vzájemně fixovány příčnými vazbami. Molekulová hmotnost komerčních želatin se pohybuje v rozmezí hodnot 50 až 200 tisíc, v některých případech až 1 milion.

Modifikace vlastností želatiny v žádoucím nebo nežádoucím smyslu je možno dosáhnout chemickou obměnou její molekuly. Mohou reagovat hydroxyskupiny, karboxyskupiny i aminoskupiny. Řízené reakce mohou probíhat v teplotním rozmezí 35-80°C, tedy v roztoku želatiny, kdy nedochází k hydrolýze polypeptidu. V některých případech je žádoucí kontrolovaná hydrolýza želatiny. Snížení schopnosti gelace bývá dosaženo acylací, především acetylací, ftalylací a laurylací.

Jako reakce modifikující vlastnosti želatiny bylo popsáno odstranění jejich postranních skupin (deguanidace, deaminace), případně substituce postranních hydroxy a aminoskupin alkylovými zbytky. Vázání ionogenních tenzidů na želatinu při různých podmínkách je jedнокrokový proces, spočívající v elektrostatických interakcích. Bylo zjištěno, že změna povrchového napětí reakcí želatiny se sodnou solí síranu kyseliny laurové nezávisí na pH prostředí.

Etylenoxid používaný ke sterilizaci farmaceutických surovin je pro želatinu nevhodný, protože se adsorbuje na surovinu a denaturuje ji. Příčným spřažením jednotlivých řetězců želatiny se zvyšuje její molekulová hmotnost s dopadem na další vlastnosti materiálu. Zahřátí želatiny na teploty vyšší než 100°C vede ke vzniku příčných vazeb esterového typu. Příčné vazby se vytvářejí také působením UV záření.

Velmi intenzivním přemosťujícím činidlem je formaldehyd v různé koncentraci, který je schopen stabilizovat šroubovicovou strukturu želatiny i při vyšších teplotách.<sup>24</sup>

## 2.8 Nanočástice stříbra

Nanočástice stříbra díky svým unikátním vlastnostem, jako jsou například optické, katalytické nebo antibakteriální vlastnosti, jsou čím dál více zkoumanými materiály v mnoha vědeckých laboratořích po celém světě.

V oblasti biologické aktivity mají tyto nanočástice ohromnou antibakteriální aktivitu při výrazně nižší cytotoxicitě, než iontové stříbro. U katalýzy se stříbrné nanočástice



využívají především při katalytické redukci organických látek, které prokazatelně svou toxicitou škodí životnímu prostředí.<sup>25</sup>

### 2.8.1 Příprava nanočástic stříbra

V dnešní době je prozkoumáno velké množství příprav nanočástic stříbra, ale mezi použitelné, co se týká stabilizace částic a jejich distribuce velikostí patří jen několik málo vhodných.

Mezi jednu z těchto příprav patří tzv. Tollensova příprava, která je založena na redukci roztoku stříbrné soli v amoniakálním prostředí, kde vznikne komplexní kationt  $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$  redukovaný slabými redukčními látkami jako jsou cukry.<sup>25</sup>

Další přípravou nanočástic stříbra je redukce  $\text{Ag}^+$  iontů z  $\text{AgNO}_3$  roztokem  $\text{NaBH}_4$  za neustálého míchání v ledové lázni po dobu dvou hodin.<sup>26</sup> Podobnou metodou jako je metoda předchozí pro přípravu AgNPs je metoda, kdy místo redukčního činidla  $\text{NaBH}_4$  se používá glukóza a roztok se vaří pod zpětným chladičem v deionizované vodě za stálého míchání po dobu tří hodin.<sup>27</sup>

U všech metod přípravy je velký problém se stabilizací částic a následnou trvanlivostí. Tento problém se dá řešit zavedením želatiny do roztoku při dané přípravě, kde želatina slouží jako vynikající stabilizátor částic proti následné agregaci.

### 2.8.2 Stabilizace želatinou

Potenciál, který je potřebný pro manipulaci s veškerými nanočásticemi, tedy i s nanočásticemi stříbra je velice důležitý pro stabilitu částic proti agregaci. Z tohoto důvodu se klade důraz na tento fakt, a hledá se vhodná látka pro stabilizaci nanočástic. Byl prokázán vztah mezi velikostí a biologickou aktivitou nanočástic stříbra. Zjistilo se, že želatina, která se přidala před redukcí nanočástic stříbra Tollensovým způsobem, má vskutku stabilizační schopnosti a to více než o řád vyšší (na základě kritické koncentrace koagulace- CCC). Vysoká stabilita želatiny proti agregaci byla prokázána v širokém rozmezí pH(2 až 13). Želatina neplní jen úlohu vynikajícího stabilizátoru, ale také pozitivně ovlivňuje modifikovaný Tollensův postup používaný k přípravě nanočástic stříbra. Průměr nanočástic stříbra modifikovaných želatinou je v porovnání s těmi u kterých želatina použita nebyla podstatně menší. Kromě toho, nanočástice stříbra stabilizované želatinou vykazují dlouhodobou stabilitu proti agregaci a udržují vysokou antibakteriální aktivitu.<sup>12</sup>

## 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1 Chemikálie

Chemikálie, použité v experimentální části bakalářské práce jsem uvedl v tabulce číslo 2. Pro přípravu všech roztoků potřebných pro můj výzkum jsem používal demineralizovanou vodu z přístroje AQUAL29 firmy MERCI o čistotě 0,05  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Tabulka 2:** Seznam použitých chemikálií.

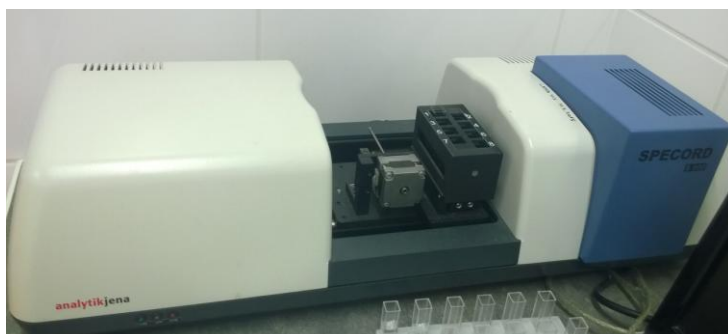
Název	Výrobce	Čistota
dusičnan stříbrný	Fagron	ČL4
dusičnan draselný	Lach-Ner	p.a.
hydroxid sodný	Lach-Ner	p.a.
amoniak	Lach-Ner	p.a.
kyselina chloristá	Lach-Ner	p.a.
disperze částic polystyrenu o velikosti 200 nm ve vodě	Nanosphere <sup>TM</sup>	p.a.
D(+) maltóza monohydrát	Sigma Aldrich	p.a.
Uhličitan sodný (bezvodý)	Penta	p.a.
želatina	Penta	p.a.
formaldehyd	Penta	p.a.
metanol	Penta	p.a.

### 3.2 Přístroje a vybavení

#### 3.2.1 Spektrometr Specord S600

Pro měření spekter byl využit spektrometr Specord S600 od výrobce Analytik Jena. Tento přístroj díky detektoru diodového pole je velice přesný a hlavně rychlý. Jeho rozsah měření se pohybuje v rozmezí vlnových délek od 190 nm do 1020 nm.

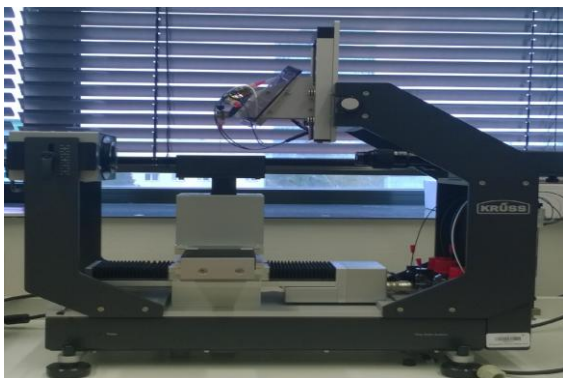
**Obrázek 5:** Spektrofotometr Specord S600.



### 3.2.2 Příklad na měření kontaktního úhlu

Přístroj, který jsem využíval pro měření kontaktního úhlu, tedy pro pozorování chování jednotlivých kapek nanesených na pevný povrch se nazývá DSA30 od firmy Krüss.

Obrázek 6: Krüss – Contact angle DSA30.



### 3.2.3 Zetasizer NanoZS

Tento přístroj díky kombinaci vysoce intenzivního laseru a fázové analýzy světla (PALS) s technikou Malvern M3-PALS, má vysokou citlivost, přesnost a rozlišení zeta potenciálu. Kromě klasického potenciálu zeta v disperzi, je schopen měřit zeta potenciál nanosené vrstvy díky přiloženému příslušenství, které dodává pouze firma Malvern. Přístroj Zetasizer NanoZS mi posloužil jednak k měření zeta potenciálu, ale také k měření velikosti částic, kterou stanovuje pomocí měření Brownova pohybu na základě dynamického rozptylu světla (DLS).

Obrázek 7: Zetasizer NanoZS.



Obrázek 8: Zetasizer NanoZS- prostor pro vložení květy.



### 3.2.4 Příprava nanočástic stříbra

Nanočástice stříbra jsem připravoval pomocí tzv. Tollensovy metody, která spočívá v redukci diammin stříbrného kationtu disacharidem maltózou v alkalickém prostředí.

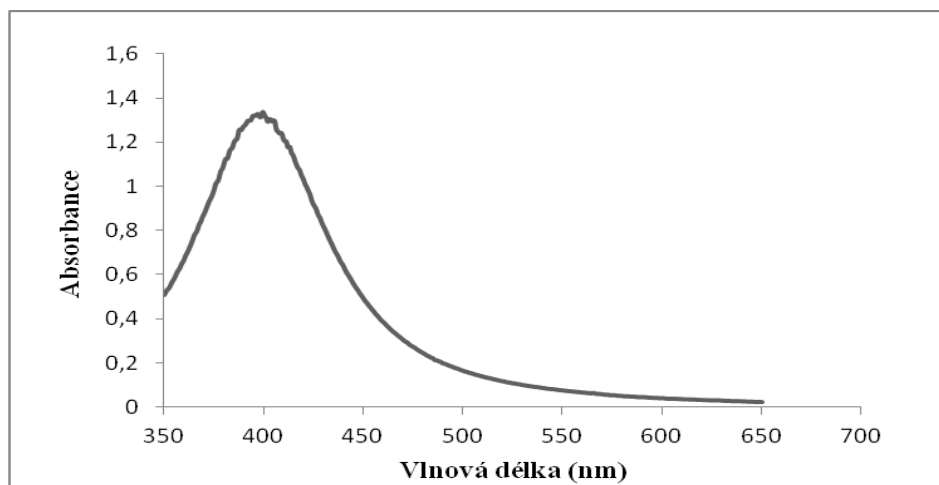
Pro přípravu koloidní disperze s nanočásticemi stříbra jsem si připravil zásobní roztoky o definovaných koncentracích:

- 50 ml roztoku  $\text{AgNO}_3$  o koncentraci  $5 \cdot 10^{-3} \text{ mol.dm}^{-3}$
- 50 ml roztoku  $\text{NH}_3$  o koncentraci  $5 \cdot 10^{-2} \text{ mol.dm}^{-3}$
- 50 ml roztoku  $\text{NaOH}$  o koncentraci  $2,5 \cdot 10^{-1} \text{ mol.dm}^{-3}$
- 25 ml roztoku maltózy o koncentraci  $5 \cdot 10^{-2} \text{ mol.dm}^{-3}$
- 25 ml roztoku želatiny s hmotnostním zlomkem 2,5 %

Do kádinky o objemu 150 ml jsem za stálého míchání přidal 5 ml ze zásobního roztoku  $\text{AgNO}_3$ , dále 8 ml demineralizované vody, 5 ml  $\text{NH}_3$ , 1 ml  $\text{NaOH}$  a 5 ml maltózy. Reakce byla ukončena po 5 minutách míchání, kdy z počátku průhledný roztok změnil barvu na žluto-hnědý. Velikost nanočástic stříbra byla okolo 35 nm a hodnota zeta potenciálu byla -30,5 mV.

Pro nanočástice stříbra o kolo 30 nm je při měření UV-VIS spekter charakteristický absorpční pík ve VIS spektru při vlnové délce 410 nm.

**Obrázek 9:** UV-VIS spektrum disperze nanočástic stříbra.

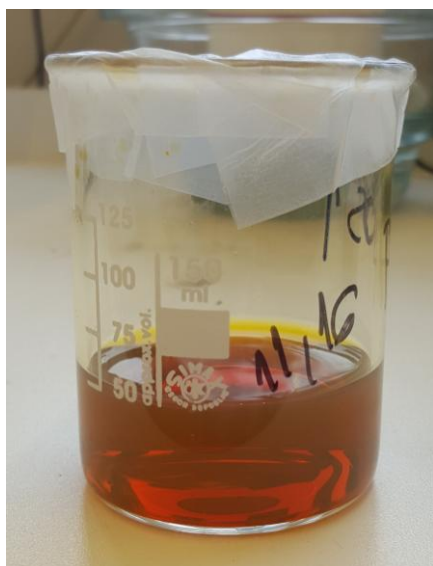


### 3.3 Postup pro stanovení zeta potenciálu v závislosti na pH ve vodné disperzi

V mé bakalářské práci jsem pracoval s dvěma typy koloidů, oba typy byly stabilizované 0,1 % roztokem želatiny od firmy Penta. První typ koloidu byl připraven tak, že roztok želatiny se přidal až po redukci, tedy až po ukončení reakce tvorby nanočástic stříbra, kdy jsem přidal 1 ml 2,5% želatiny – POSTUP1.

**Obrázek 10:** Disperze nanočástic stříbra za přidání želatiny po redukci.

(POSTUP1)



**Obrázek 11:** Disperze nanočástic stříbra za přidání želatiny před redukci.

(POSTUP2)



Druhý postup se lišil od prvního v tom, že roztok želatiny jsem přidal už před redukcí, tedy před hydroxidem sodným a maltózou. V tomhle případě si šlo všimnout, jak želatina plní funkci stabilizátoru (POSTUP2). U postupu, kdy se přidala želatina před redukcí, není přítomen viditelný zákal. Přidání želatiny také způsobovalo to, že se značně zpomalila reakce a muselo se na ukončení reakce čekat 24 hodin.

Dalším krokem, tedy krokem po přípravě obou koloidů a následně ukončené reakci je nastavení pěti různých hodnot pH. Pracoval jsem s hodnotami pH 2,4,7,9 a 12. Hodnoty pH jsem nastavoval v 50 ml kádinkách. Do pěti kádinek jsem pomocí automatických pipet naměřil 8 ml koloidu jak POSTUPu1, tak do dalších pěti kádinek po 8 ml koloidu POSTUPu2. Po odměření daného objemu následovalo nastavení pH, které jsem nastavoval po kapkách pomocí kyseliny chloristé a hydroxidu sodného a následně měřil pH metrem od firmy Eutech Instruments. Ve chvíli, kdy jsem nastavil potřebné hodnoty pH jsem mohl začít měřit zeta potenciál na Zetasizer NanoZS, pomocí speciální kyvety pro měření tohoto potenciálu v disperzi.

**Obrázek 12:** Speciální kyveta pro měření zeta potenciálu vodné disperze nanočástic.



### **3.4 Postup pro stanovení zeta potenciálu v závislosti na pH u nanosené vrstvy**

Metoda měření zeta potenciálu vrstvy je mnohem složitější oproti měření v disperzi a proto obsahuje mnohem více kroků přípravy vzorku i samotného měření. Prvním krokem bylo opět připravení dvou koloidů stříbra lišící se okamžikem přidání roztoku želatiny, tedy POSTUP1 a POSTUP2.

Druhým krokem následovalo nanesení želatinové vrstvy s nanočásticemi stříbra na vhodný materiál. Jako první materiál sloužící jako podklad pro vrstvu jsem zvolil aluminiovou fólii z důvodu dobré manipulace a možnost snadného uříznutí potřebné plochy pro měření. Bohužel tato fólie nebyla vhodným materiálem z důvodu toho, že při měření kdy je sonda ponořena v roztoku, docházelo k určité interakci kovového hliníku alobalu s roztokem a tím bylo měření značně nepřesné a takřka nemožné zreprodukovat. Jako další materiál pro podložku byl zvolen celofán, jednak kvůli své stálosti v kapalně fázi a hlavně nepřítomnosti kovových částic ovlivňujících měření.

K nanášení vrstvy jsem používal mikroskopická podložní sklíčka, Petriho misky a lepidlo chemopren. Samotné nanášení probíhalo následovně: nůžkami jsem si nastříhal potřebný počet celofánových pásků o přibližné velikosti a tvaru odpovídající mikroskopickým sklíčkům, které jsem měl k dispozici. Po nastříhání celofánu jsem si připravil nasycený roztok uhličitanu sodného a následně proužky celofánu vložil na půl hodiny do roztoku z důvodu odmaštění materiálu. Po odmaštění celofánu jsem pásky propral v demineralizované vodě a dal na 20 minut vysušit do sušárny při teplotě 60° C. Jakmile byly pásky celofánu suché, mohl jsem je připevnit na sklíčka pomocí lepidla. Po nalepení celofánu, vždy malou kapkou lepidla na obou koncích pásků jsem mikroskopická sklíčka s připevněným celofánem vložil do Petriho misky a zalil vždy až

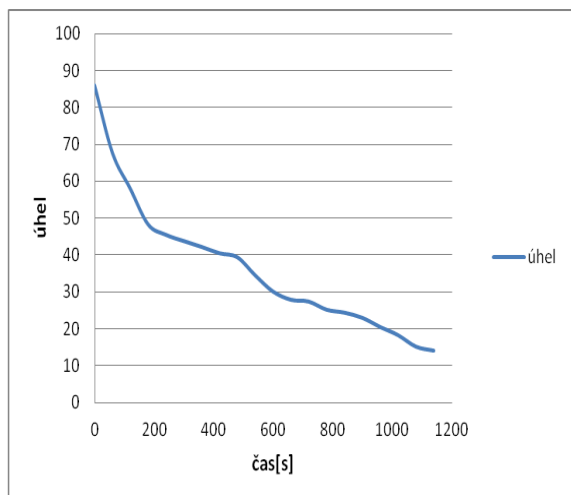
po okraj misky koloidem stříbra stabilizovaným želatinou, dvě misky koloidem připraveným POSTUPem1 a dvě misky POSTUPem2. Tyto misky jsem vložil do předem vyhřáté sušárny na 60° C na 24 hodin. Po úplném vyschnutí celého objemu koloidu a ukotvení vrstvy na celofán jsem jednoduše skalpelem odřízl pásky celofánu od sklíčka.

**Obrázek 13:** Nanesená vrstva koloidu stříbra s želatinou na celofánu.

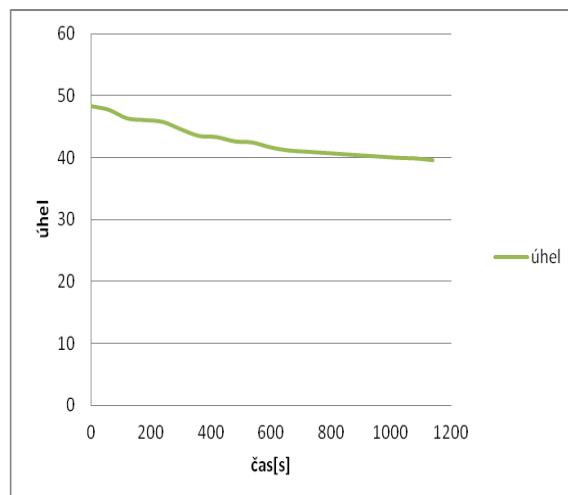


Ve fázi, kdy jsem měl připravenou vrstvu, přišel krok týkající se vytvrzení vrstvy. Vytvrzení bylo nutné, aby se želatinová vrstva během měření ve vodě nerozpouštěla a tím smývala. Želatinu jsem vytvrzoval 10% roztokem formaldehydu a to tak, že se celofán s nanesenou vrstvou vložil do kádinky s roztokem formaldehydu na 30 minut. Abych zjistil, jestli vytvrzení proběhlo úspěšně, změřil jsem kontaktní úhel pro vodu na přístroji Krüss DSA30. Podle výsledků měření kontaktních úhlů v čase, bylo vidět, že vytvrzení proběhlo úspěšně podle toho, že kontaktní úhel kapky na podkladu vytvrzené vrstvy se zmenšoval podstatně méně a hlavně na časové ose byl mnohem déle stabilnější vůči rozpouštění, než tomu bylo u nevytvrzené vrstvy (viz Obr. 14 a 15).

**Obrázek 14:** Změna kontaktního úhlu v čase nevytvrzené vrstvy.

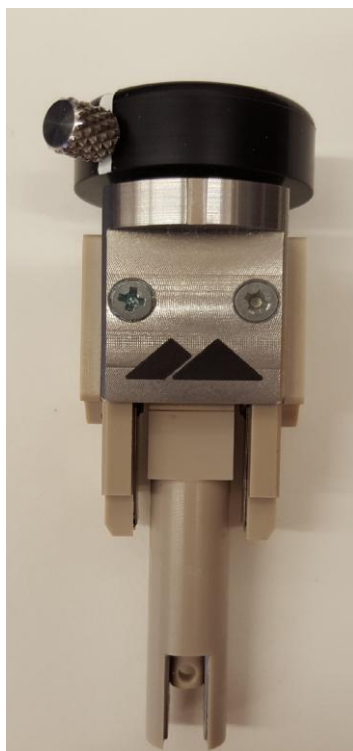


**Obrázek 15:** Změna kontaktního úhlu v čase vytvrzené vrstvy.

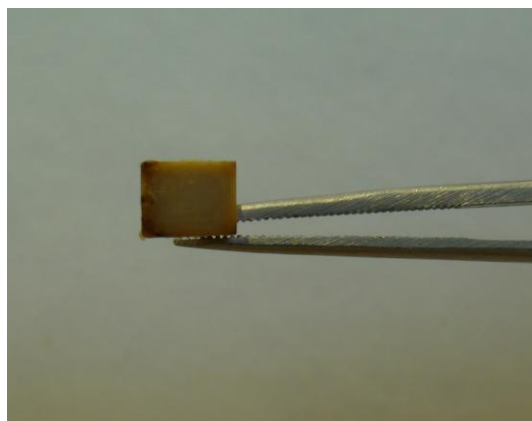


Jakmile byla vrstva vytvrzena, přišel čas na zachycení celofánu na nástavec speciální elektrody určené pouze k měření zeta potenciálu vrstvy.

**Obrázek 16:** Speciální elektroda pro měření zeta potenciálu vrstvy.



**Obrázek 17:** Nástavec pro uchopení podkladu s vrstvou.



Nanesení celofánu na nástavec jsem prováděl pomocí parafilmu, kterým jsem přetáhl přes nástavec a následně opatrně nahřál zapalovačem z důvodu zvýšení přilnavosti. Poté jsem nástavec s lepkavým parafilmem přiložil na celofán se stříbrnou vrstvou a skalpelem vyříznul přesný rozměr jaký má nástavec. Takto připravený nástavec se upevnil malým plastovým šroubkem ke spodní části elektrody a poté se elektroda se vzorkem zasunula do klasické plastové kyvety, kde byla už předem připravená referenční disperze polystyrenu 20x naředěná s nastavenou hodnotou pH pro dané měření. Následně se elektroda s kyvetou vložila do přístroje Zetasizer NanoZS.

Jakmile jsem měl připravenou elektrodu s vytvrzenou vrstvou a správně naředěnou disperzi polystyrenu s definovanou hodnotou pH, mohl jsem začít měřit.



## 4. VÝSLEDKY

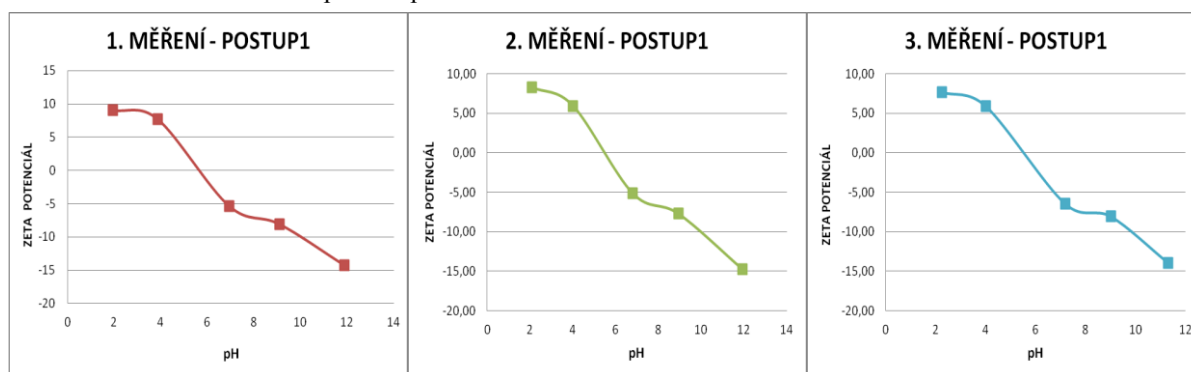
### 4.1 Závislost zeta potenciálu vodné disperze nanočástic stříbra stabilizovaných želatinou na pH

Po nastavení pěti hodnot pH, jak pro disperze dle POSTUPu1, POSTUPu2, tak i čistého roztoku želatiny následovalo měření všech disperzí. Každé měření jsem třikrát opakoval.

**Tabulka 3:** Výsledky tří měření POSTUPu1 závislosti zeta potenciálu disperze na pH želatina přidaná po redukci.

1. MĚŘENÍ - POSTUP1		2. MĚŘENÍ - POSTUP1		3. MĚŘENÍ - POSTUP1	
pH	ZETA POTENCIÁL [mV]	pH	ZETA POTENCIÁL [mV]	pH	ZETA POTENCIÁL [mV]
1,95	9,02	2,08	8,25	2,25	7,68
3,87	7,67	4,00	5,94	4,01	5,90
6,93	-5,39	6,80	-5,12	7,19	-6,45
9,09	-8,12	8,94	-7,69	9,01	-8,04
11,88	-14,31	11,94	-14,70	11,32	-13,94

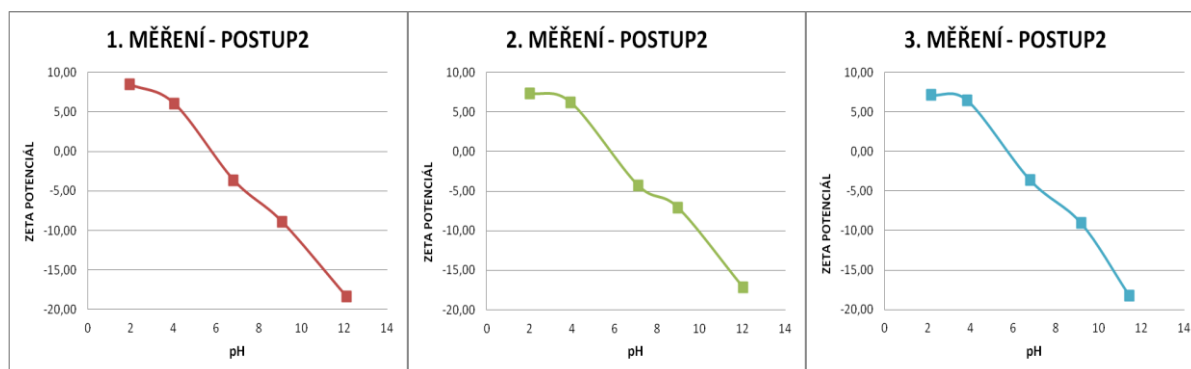
**Obrázek 18:** Grafy tří měření POSTUPu1 závislosti zeta potenciálu disperze na pH želatina přidaná po redukci.



**Tabulka 4:** Výsledky tří měření POSTUPu2 závislosti zeta potenciálu disperze na pH želatina přidaná před redukcí.

1. MĚŘENÍ - POSTUP2		2. MĚŘENÍ - POSTUP2		3. MĚŘENÍ - POSTUP2	
pH	ZETA POTENCIÁL [mV]	pH	ZETA POTENCIÁL [mV]	pH	ZETA POTENCIÁL [mV]
1,95	8,46	2,04	7,36	2,16	7,17
4,04	6,03	3,95	6,21	3,85	6,50
6,81	-3,63	7,11	-4,32	6,80	-3,60
9,07	-8,89	8,96	-7,08	9,18	-9,03
12,10	-18,40	12,02	-17,20	11,44	-18,20

**Obrázek 19:** Grafy tří měření POSTUPu2 závislosti zeta potenciálu disperze na pH želatina přidaná před redukcí.



Jako poslední měření jsem provedl opět třikrát měření samotné želatiny. Její 0,1% roztok jsem připravil následovně:

- 5 ml  $\text{KNO}_3$  o koncentraci  $1,25 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  (zachování iontové síly)
- 13 ml demineralizované vody
- 1 ml  $\text{NaOH}$  o koncentraci  $2,5 \cdot 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
- 5 ml maltózy o koncentraci  $5 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
- 1 ml 2,5% roztoku želatiny

**Tabulka 5:** Výsledky tří měření disperze želatiny závislosti zeta potenciálu disperze na pH.

<b>1. MĚŘENÍ- ŽELATINA</b>		<b>2. MĚŘENÍ- ŽELATINA</b>		<b>3. MĚŘENÍ- ŽELATINA</b>	
<b>pH</b>	<b>ZETA POTENCIÁL [mV]</b>	<b>pH</b>	<b>ZETA POTENCIÁL [mV]</b>	<b>pH</b>	<b>ZETA POTENCIÁL [mV]</b>
1,98	9,54	2,06	11,50	1,93	12,10
4,05	6,76	4,01	8,40	4,11	8,20
6,72	0,53	7,13	-0,72	6,99	0,98
8,98	-1,32	8,93	-2,93	9,09	-4,88
11,68	-18,20	11,95	-16,50	12,05	-11,20

**Obrázek 20:** Grafy tří měření disperze želatiny závislosti zeta potenciálu disperze na pH.



## 4.2 Závislost zeta potenciálu želatinové vrstvy s obsahem nanočástic stříbra na pH

Při tomhle měření jsem opět použil měření pro pět hodnot pH, rozdíl oproti měření vodné disperze byl v tom, že při měření zeta potenciálu vrstvy se nenastavuje pH koloidu stříbra, ale referenční disperze polymerního polystyrenu. Hodnoty pH jsem opět nastavoval pomocí roztoku kyseliny chloristé a roztoku hydroxidu sodného.

Než jsem začal měřit závislost zeta potenciálu na pH, tak jsem v první řadě provedl dvanáct testovacích měření. První tři byly samotného parafilmu, poté celofánu, další tři byly POSTUPu1 bez úpravy pH a poslední tři byly POSTUPu2 opět pH nezměněno.

Tabulka 6: Test povrch parafilmu.

pH <sub>(polystyren)</sub> = 5,30	
pokus	zeta potenciál
1.	-72,8 mV
2.	-65,2 mV
3.	-69,6 mV

Tabulka 7: Test měření celofán.

pH <sub>(polystyren)</sub> = 5,30	
pokus	zeta potenciál
1.	-48,6
2.	-55,2
3.	-52,6

Tabulka 8: Test měření postup1 povrch.

pH <sub>(polystyren)</sub> = 5,30	
pokus	zeta potenciál
1.	-32,6 mV
2.	-31,2 mV
3.	-31,8 mV

Tabulka 9: Test měření postup2 povrch.

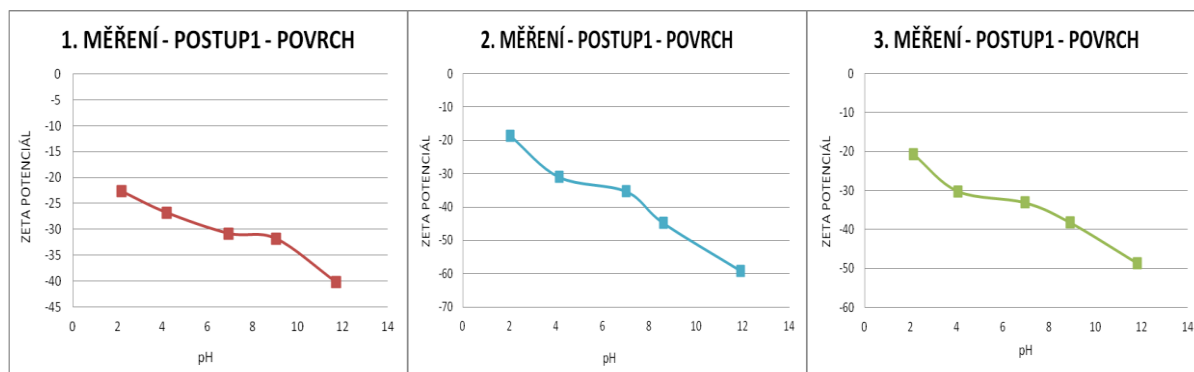
pH <sub>(polystyren)</sub> = 5,30	
pokus	zeta potenciál
1.	-32,8 mV
2.	-31,3 mV
3.	-32,1 mV

Jakmile jsem si byl jistý v přesnosti měření, kdy výsledky testovacího měření se lišily jen v jednotkách milivoltů, mohl jsem začít měřit připravené vzorky želatinové vrstvy s obsahem nanočástic stříbra.

**Tabulka 10 :** Výsledky tří měření postupu1 závislosti zeta potenciálu vrstvy na pH želatina přidaná po redukcí.

<b>1. MĚŘENÍ - POSTUP1 - POVRCH</b>		<b>2. MĚŘENÍ - POSTUP1 - POVRCH</b>		<b>3. MĚŘENÍ - POSTUP1 - POVRCH</b>	
<b>pH</b>	<b>ZETA POTENCIÁL [mV]</b>	<b>pH</b>	<b>ZETA POTENCIÁL [mV]</b>	<b>pH</b>	<b>ZETA POTENCIÁL [mV]</b>
2,17	-22,7	2,04	-18,6	2,12	-20,7
4,17	-26,8	4,14	-31,01	4,05	-30,2
6,93	-30,8	7,01	-35,3	6,95	-33,1
9,03	-31,8	8,61	-44,8	8,92	-38,2
11,71	-40,2	11,92	-59,1	11,83	-48,6

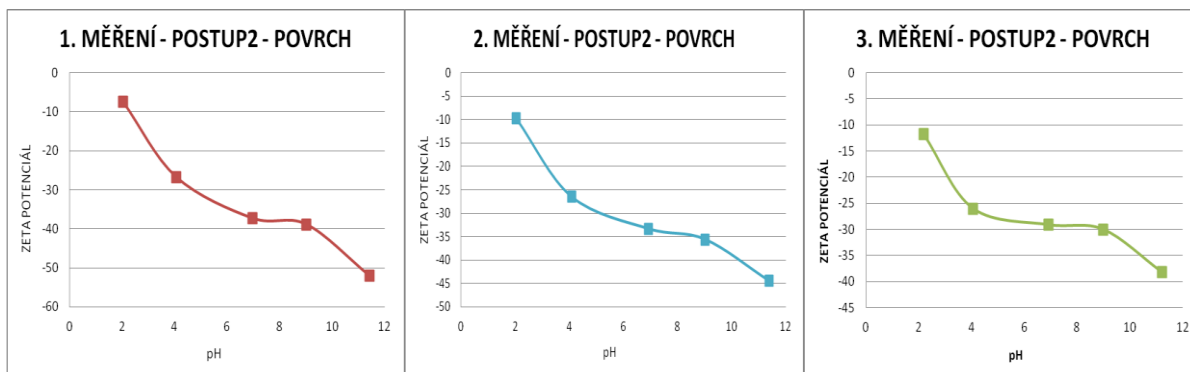
**Obrázek 21:** Grafy tří měření postupu1 závislosti zeta potenciálu vrstvy na pH



**Tabulka 11:** Výsledky tří měření postupu2 závislosti zeta potenciálu vrstvy na pH  
Želatina přidaná před redukcí

1. MĚŘENÍ - POSTUP2 - POVRCH		2. MĚŘENÍ - POSTUP2 - POVRCH		3. MĚŘENÍ - POSTUP2 - POVRCH	
pH	ZETA POTENCIÁL [mV]	pH	ZETA POTENCIÁL [mV]	pH	ZETA POTENCIÁL [mV]
2,04	-7,48	2,03	-9,72	2,18	-11,8
4,07	-26,8	4,08	-26,5	4,05	-26,0
6,96	-37,3	6,93	-33,4	6,90	-29,1
9,02	-38,9	9,01	-35,6	8,99	-30,0
11,42	-52,1	11,38	-44,5	11,22	-38,2

**Obrázek 22:** Grafy tří měření postupu2 závislosti zeta potenciálu vrstvy na pH



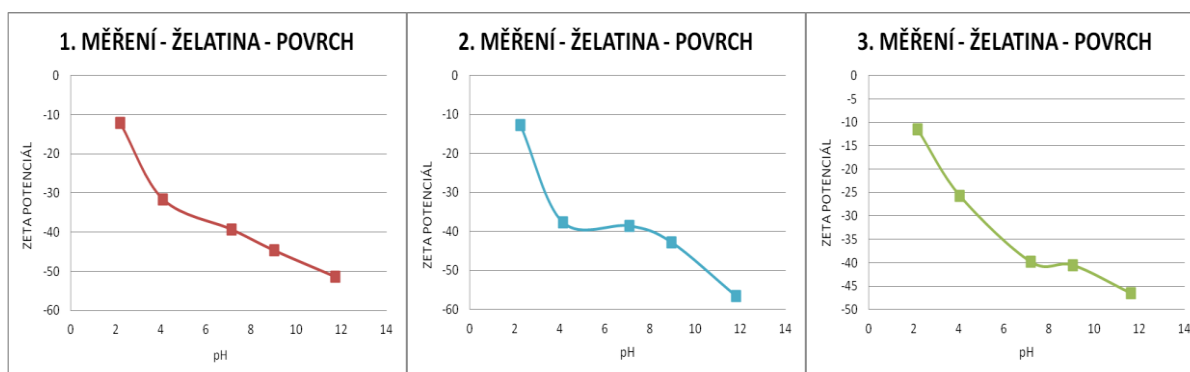
Ve chvíli, kdy jsem doměřil zeta potenciál želatinové vrstvy obsahující nanočástice stříbra, přišel čas opět na změření samotné želatinové vrstvy. Její 0,1% roztok jsem připravil následovně:

- 5 ml  $\text{KNO}_3$  o koncentraci  $1,25 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  (zachování iontové síly)
- 13 ml demineralizované vody
- 1 ml  $\text{NaOH}$  o koncentraci  $2,5 \cdot 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
- 5 ml maltózy o koncentraci  $5 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
- 1 ml 2,5% roztoku želatiny
- pár kapek methylenové modři pro lepší viditelnost vrstvy

**Tabulka 12:** Výsledky tří měření disperze želatiny závislosti zeta potenciálu vrstvy na pH.

1. MĚŘENÍ - ŽELATINA - POVRCH		2. MĚŘENÍ - ŽELATINA - POVRCH		3. MĚŘENÍ - ŽELATINA - POVRCH	
pH	ZETA POTENCIÁL [mV]	pH	ZETA POTENCIÁL [mV]	pH	ZETA POTENCIÁL [mV]
2,19	-12,2	2,25	-12,7	2,15	-11,5
4,09	-31,6	4,13	-37,6	4,03	-25,7
7,12	-39,3	7,08	-38,5	7,18	-39,8
9,02	-44,6	8,94	-42,7	9,04	-40,5
11,73	-51,3	11,8	-56,5	11,62	-46,5

**Obrázek 23:** Grafy tří měření disperze želatiny závislosti zeta potenciálu vrstvy na pH



## 5. DISKUZE

Závěrem této bakalářské práce je vícero zjištění. Prvním významnějším poznatkem je funkce želatiny jako skvělého stabilizátoru, kdy stačilo jen pozměnění doby přidání želatiny do připravované disperze nanočástic stříbra a okamžitě si šlo všimnout (viz Obr. 10-11) skvělé splnění funkce stabilizátoru, kdy koloid s přidáním roztoku želatiny před redukcí neobsahoval viditelný zákal oproti koloidu s přidanou želatinou po redukcí.

Dalším výsledkem bylo potvrzení vlivu změny pH na zeta potenciál částic, kdy rozdíl hodnot zeta potenciálu, jak v kyselém prostředí, tak v zásaditém prostředí byl velký.

Nejdůležitější částí této práce bylo porovnání zeta potenciálu vodné disperze a zeta potenciálu vrstvy opět v závislosti na změně pH. Jelikož je technika určená k měření zeta potenciálu povrchu velice nová a toto měření není zdaleka tak prozkoumané oproti měření zeta potenciálu disperze, které je v dnešní době běžnou věcí, byly výsledky zeta potenciálu povrchu před měřením jen odhadované a po dokončení měření tím více překvapivé.

Při měření vodné disperze nanočástic stříbra stabilizovaných želatinou byly hodnoty zeta potenciálu velmi nízké. Jak u POSTUPu1, tak i u POSTUPu2 bylo rozmezí zeta potenciálu cca od 9 mV do -15 mV, přičemž pH pro nulový potenciál (izoelektrický bod) bylo v obou případech prakticky totožné, cca 5,5. U zeta potenciálu želatinové vrstvy obsahující nanočástice stříbra byla situace výrazně jiná, potenciály se pohybovaly jen v záporné oblasti a to v rozmezí hodnot od -20 mV do -50 mV. Velice zajímavou skutečností je rozdíl hodnot zeta potenciálu mezi disperzí a vrstvou v kyselém prostředí, kdy zeta potenciál disperze při hodnotách pH 2 a 4 je v kladných hodnotách, jak u POSTUPu1, tak i u POSTUPu2. Do záporných hodnot se dostává až při neutrálním prostředí. Značně odlišné výsledky zeta potenciálu, jak už jsem zmínil, jsou u vrstvy, kdy při značně kyselém prostředí – pH 2 jsou hodnoty zeta potenciálu okolo -20 mV, což u disperze není ani při velice zásaditém prostředí, kdy při pH 12 se pohybovaly hodnoty zeta potenciálu okolo -14 mV. Tento fakt je dalším velkým rozdílem mezi zeta potenciálem disperze a povrchu, kdy u disperze je rozdíl mezi krajními hodnotami pH (2-12) řádově -5 mV, tak u vrstvy je rozdíl kolem -30 mV. Co se týká rozdílu mezi jednotlivými postupy lišící se dobou přidání roztoku želatiny před redukcí a po redukcí, tak tam nebyly pozorovány zásadní rozdíly (maximálně jednotky mV). Největší rozdíl z hlediska okamžiku přidání želatiny tak byl zaznamenán ve stabilizaci a následné přítomnosti zákalu.

Zásadní rozdíl mezi naměřenými hodnotami zeta potenciálu vodné disperze nanočástic stříbra a želatinových vrstev s obsahem nanočástic stříbra může mít několik důvodů:

1. Z hlediska rozdílného principu měření zeta potenciálu volných částic a částic zakotvených ve vrstvě nejsou výsledky obou měření porovnatelné. To může být dáno zejména faktem, že ve vodné disperzi je měřen skutečně zeta potenciál nanočástic stříbra, jak dokumentuje rozdíl mezi disperzemi s nanočásticemi



stříbra a čistou želatinou, ale ve vrstvě hraje dominantní roli želatina, čemuž by napovídala obdobná závislost zeta potenciálu na pH u vrstev se stříbrem a bez stříbra.

2. Proces vytvrzení želatiny má zásadní vliv na její elektrické vlastnosti (změna disociovatelných skupin) a proto se želatinová vrstva chová zásadně jinak než roztok želatiny. Tuto hypotézu podporuje významný rozdíl mezi zeta potenciálem čisté želatiny v roztoku a čisté želatiny ve vrstvě.
3. Uspořádání elektrické dvojvrstvy v případě vodné disperze nanočástic stříbra s jiným obsahem elektrolytů než je tomu v případě naředěné disperze polystyrenových částic vede k rozdílnému chování studovaných systémů. Tato hypotéza je ale nejméně pravděpodobná, protože nevysvětluje situaci, kdy želatinové vrstvy mají v celém testovaném pH záporný potenciál.

## 6. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo prozkoumat vliv pH na zeta potenciál nanočástic stříbra ve vodné disperzi a zeta potenciál vrstvy nanočástic stříbra dispergovaných v želatině a zároveň porovnat tyto hodnoty mezi sebou. Nanočástice stříbra jsem připravil modifikovanou Tollensovou metodou, která spočívá v redukci dusičnanu stříbrného disacharidem maltózou. Zeta potenciál jsem měřil pomocí přístroje Zetasizer NanoZS.

Pro každé měření jak u POSTUPu1, kdy byla želatina přidána po redukci, tak i u POSTUPu2, želatina přidána před redukcí, jsem provedl vždy tři měření kvůli prokázání reprodukovatelnosti měření zeta potenciálu v daném systému.

Jak si lze všimnout podle výsledků měření, byla reprodukovatelnost prokázána, kdy hodnoty zeta potenciálu se lišily pouze v jednotkách milivoltů.

Překvapivým výsledkem této práce je značná odlišnost zeta potenciálu mezi vodnou disperzí a nanosenou vytvrzenou vrstvou. Ve vodné disperzi byly hodnoty zeta potenciálu velice nízké u obou postupů a hlavně měly v kyselém prostředí kladnou hodnotu zeta potenciálu. Do záporných hodnot přecházel zeta potenciál až při neutrálním prostředí (izoelektrický bod okolo  $\text{pH}=5,5$ ).

Největší rozdíl mezi disperzí a vrstvou je ve velikosti potenciálu. Ve vodné disperzi byla nejvyšší hodnota zeta potenciálu při  $\text{pH}$  12 okolo  $-14$  mV, kdežto u zeta potenciálu vrstvy tato hodnota byla naměřena už ve vysoce kyselém prostředí, tedy při  $\text{pH}$  2, kdy u disperze byl zeta potenciál kladný okolo  $7-8$  mV. Nejvyšší hodnota zeta potenciálu u vrstvy byla naměřena stejně jako u disperze v zásaditém prostředí a to při hodnotě  $\text{pH}$  12, kdy hodnoty zeta potenciálu se pohybovaly okolo  $-50$  mV, což je rozdíl cca  $35$  mV oproti vodné disperzi při stejném  $\text{pH}$ .

Z následujících poznatků lze vypořadovat, že zeta potenciál s rostoucím  $\text{pH}$  výrazně roste do záporných hodnot, což lze připsat disociaci kyselých skupin želatiny či adsorpci  $\text{OH}^-$  iontů na povrchu nanočástic. Dále si lze všimnout, že hodnoty zeta potenciálu mezi vodnou disperzí a vrstvou se výrazně liší, přičemž jednoznačné vysvětlení tohoto jevu není na základě provedených experimentů možné. V úvahu přichází dva mechanismy – v obou systémech se buď měří různé materiály (nanočástice stříbra ve vodné disperzi či želatina ve vrstvě) nebo použitý proces vytvrzování želatiny formaldehydem zásadně ovlivňuje její elektrochemické vlastnosti.

## 7. SUMMARY

The aim of this bachelor thesis was to inspect the impact of pH on a zeta potential of silver nanoparticles in aqueous dispersion and a zeta potential of layers of silver nanoparticles dispersant in gelatin and at the same time to compare these values with each other. The silver nanoparticles were prepared by the modified Tollens method, which lies in reduction of nitrate silver with disaccharide maltose. The zeta potential was measured by ZetasizerNanoZS device.

For every measurement as in proceeding 1 (POSTUPu1), when the gelatin was added after reduction and proceeding 2 (POSTUPu2), when the gelatin was added before reduction, we always accomplished three measurements to demonstrate the reproducibility of the measurement of the zeta potential of given system.

As visible from the results of the measurements, the reproducibility was demonstrated when the zeta potential values differed only in units of millivolts.

The surprising result of this work is the significant difference of the zeta potential between aqueous dispersion and hardened layer. The values zeta potential in aqueous dispersion were very low in both proceedings, but mainly the values of the zeta potential were positive in acidic environment. The zeta potential changed into negative values only in a neutral environment (the isoelectric point about  $\text{pH} = 5.5$ )

The largest difference between dispersion and layer is in a size of potential. The highest value of zeta potential in an aqueous dispersion with  $\text{pH} 12$  was around  $-14\text{mV}$ , whereas the value measured in the zeta potential of the layer, that is at  $\text{pH} 2$ , when the zeta potential of dispersion was positive around  $7\text{-}8\text{ mV}$ . The highest value of the zeta potential of the layer was measured as in the dispersion in alkaline environment and that with the value equal to  $\text{pH} 12$ , when values of the zeta potential were around  $-50\text{ mV}$ , which is different by circa  $35\text{ mV}$  in comparison with aqueous dispersion with the same  $\text{pH}$ .

According to these findings, it can be observed, that zeta potential with increasing  $\text{pH}$  grew boldly into negative values which can be attributed to the dissociation of the acidic groups of gelatin or the adsorption  $\text{OH}^-$  ions on the surface of the nanoparticles. Further on, it can be noticed that the values of zeta potential between aqueous dispersion and layer are quite different, however a clear explanation of this phenomena is not possible based on performed experiments. There are two gadgetry to be considered – either various materials are measured in both systems (silver nanoparticles in aqueous dispersion or gelatin in the layer) or the process used for hardening gelatin by formaldehyde significantly affects its electrochemical properties.

## 8. LITERATURA

---

- [1] L. Bartovská, M. Šišková: Fyzikální chemie koloidních povrchů a soustav, VŠCHT Praha; **2005**
- [2] J. Soukupová, L. Kvítek, M. Kratochvílová, A. Panáček, R. Prucek, R. Zbořil: *J. Chem. Educ.* 87 1094–1097; **2010**
- [3] M. Fleischmann and e. al.: *Chemical Physics Letters* 26; **1974**
- [4] L. Kvítek, A. Panáček: *Základy koloidní chemie, UP v Olomouci*; **2007**
- [5] E. D. Ščukin, A. V. Percov, E. A. Amelinová: *Koloidní chemie*, Academia Praha; **1990**
- [6] S. S. Vojuckij: *Kurs koloidní chemie*, SNTL, Praha; **1984**
- [7] I. Vavrch: *Koloidní chemie*, SNTL, Praha; **1959**
- [8] L. Kvítek, A. Panáček, J. Soukupová: *Journal of Physical Chemistry C* 2008, 112, 5825–5834. effect of surfactants and polymer; **2008**
- [9] L. Kvítek, R. Prucek: *Journal of Material Science* 2005, Springer, 2005, on-line verze: <http://springerlink.com>. article no.: s10853-005-0789-2; **2005**
- [10] D. J. Shaw: *Introduction to Colloid and Surface Chemistry*, Oxford; **2003**
- [11] <http://www.vscht.cz/fch/cz/pomucky/bartovska/10-Disperze-popis.pdf>; stáhnuté 22. 11. 2015
- [12] M. Sivera, L. Kvítek, J. Soukupová, A. Panáček, R. Prucek, R. Večeřová, R. Zbořil: Silver Nanoparticles Modified by Gelatin with Extraordinary pH Stability and Long-Term Antibacterial Activity, Olomouc; **2014**
- [13] K. Markušová, D. Kladeková: *Vybrané kapitoly z elektrochemie Učebné texty*, Univerzita P. J. Šafárika v Košicích; **2008**
- [14] Text pro předmět Metody studia koloidních soustav, Olomouc; **2010**
- [15] Příručka pro uživatele Zetasizer Nano; **2007**
- [16] [http://www.malvern.com/malvern/kbase.nsf/allbyno/KB000053/\\$file/Measurement\\_of\\_zeta\\_potential\\_using\\_an\\_Autotitrator\\_-\\_Effect\\_of\\_pH\\_MRK378-01-Low\\_res.pdf](http://www.malvern.com/malvern/kbase.nsf/allbyno/KB000053/$file/Measurement_of_zeta_potential_using_an_Autotitrator_-_Effect_of_pH_MRK378-01-Low_res.pdf); stáhnuté 23.11.2015
- [17] J. Novák a kol: *Fyzikální chemie- bakalářský a magisterský kurz*, Praha: VŠCHT Praha; **2008**
- [18] T. Cosgrove: *Colloid Science Principles, Methods and Applications*, Chichester; **2010**
- [19] Malvern, *Simplifying the measurement of zeta potential using M3-PALS*
- [20] D. H. Everett: *Basic Principles of Colloid Science*, RSC, London; **1992**
- [21] R. Prucek, L. Kvítek, J. Hrbáč.: *Acta Univ. Palacki. Olom., Chemica* 43, 59-67; **2004**
- [22] J. Soukupová, L. Kvítek, A. Panáček, T. Nevěčná, R. Zbořil: *Mater. Chem. Phys.* 111; **2008**
- [23] A. Panáček, L. Kvítek, R. Prucek, M. Kolář, R. Večeřová, N. Pizúrová, V. K. Sharma, T. Nevěčná, R. Zbořil: *J. Phys. Chem. B* 110, 16248-16253; **2006**
- [24] M. Dittrich: Studium jakosti želatinových gelů, Kandidátská disertace, Hradec Králové; **1984**
- [25] L. Kvítek, R. Prucek, J. Soukupová, A. Panáček: Nanočástice stříbra-příprava, vlastnosti a aplikace, Olomouc; **2009**
- [26] N. Eltugral, H. Simsir: Preparation of nano-silver-supported activated carbon; Nizozemsko; **2016**
- [27] S. Panigrahi, S. Ghosh, W. Spirkl, T. Pal: *Nanopart. Res.* 6, 411; **2004**
- [28] R.B. Flippin: *Modern Methods of polymer Characterization*; **1991**

