T A

Č R

Program Zéta

Metodika laboratorních koagulačních/flokulačních testů pro optimalizaci úpravy vody

Certifikovaná metodika výsledků výzkumu, vývoje a inovací

ÚSTAV PRO HYDRODYNAMIKU
Akademie věd České republiky, v. v. i.

září 2019

Autoři:
doc. RNDr. Martin Pivokonský, Ph.D. (pivo@ih.cas.cz)
RNDr. Lenka Pivokonská, Ph.D. (pivokonska@ih.cas.cz)
Ing. Petra Vašatová, Ph.D. (bubakova@ih.cas.cz)
Mgr. Jana Načeradská, Ph.D. (naceradska@ih.cas.cz)

Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i., Pod Paťankou 30/5, 166 12 Praha 6
www.ih.cas.cz

Poděkování:
Metodika vznikla za finanční podpory Technologické agentury ČR, programu ZETA, jako plánovaný výstup projektu č. TJ01000169 „Vývoj a využití nových technologií pro intenzifikaci tvorby a separace agregátů při úpravě vody – proces vysokoúčinné flokulace“.

OBSAH

1. Úvod 4
2. Cíle metodiky 5
3. Popis metodiky 5
3.1 Princip sklenicové zkoušky 5
3.2 Laboratorní vybavení ke sklenicové zkoušce 7
3.3 Míchadla pro sklenicové zkoušky a způsob stanovení intenzity míchání 8
3.4 Pracovní postup sklenicové zkoušky 10
3.4.1 Optimalizace dávky činidel pro úpravu reakčního pH a dávky koagulačního činidla 11
3.4.2 Separace agregátů při sklenicových zkouškách 12
3.4.3 Zpracování dat a vyhodnocení sklenicové zkoušky 13
3.5 Test agregace 15
3.5.1 Pracovní postup testu agregace 18
4. Novost postupů a přínos metodiky laboratorních koagulačních/flokulačních testů 18
5. Uplatnění metodiky 19
6. Ekonomické aspekty 19
7. Seznam použité související literatury 20
8. Seznam publikací předcházejících metodice 21
9. Dedikace 22
10. Přílohy 23
10.1 Fyzikální vlastnosti vody 23
10.2 Molekulové (atomové) hmotnosti 24
10.3 Přepočty hmotnostních a látkových koncentrací některých koagulačních činidel 25
10.4 Vzorové tabulky pro záznam dat sklenicové optimalizační zkoušky 31
10.5 Vzorové zpracování dat sklenicové optimalizační zkoušky 33
10.6 Ředění H_2SO_4 a HNO_3 35
10.7 Ředění HCl, NaOH a $NaHCO_3$ 36
10.8 Příprava 1% roztoku $Fe_2(SO_4)_3$ 37
10.9 Příprava 1% roztoku $Al_2(SO_4)_3$ 38

1. Úvod

Základní technologií pro úpravu vody, zejména z povrchových zdrojů, je koagulace (flokulace). Do surové vody obsahující nečistoty (obvykle v rozpuštěném nebo koloidním stavu) je dávkováno koagulační činidlo, které interaguje s částicemi nečistot, čímž dochází k potlačení, překonání nebo odstranění odpudivých sil působících mezi částicemi, k tzv. *destabilizaci*. V důsledku pohybu vody, v praxi dosahovaného mícháním, se pak mohou destabilizované částice setkávat a spojovat do větších celků, tzv. vloček (angl. *flocs*) neboli agregátů; dochází k *agregaci*. Vytvořené vločky (agregáty) je následně možné z vody separovat běžnými fyzikálními procesy, jako jsou sedimentace, flotace a filtrace.

Koagulace je tedy ovlivněna transportními procesy, jako je difúze molekul nebo pohyb částic v důsledku míchání (případně v důsledku sedimentace), a uplatňují se při ní mezimolekulární interakce, např. elektrostatické, hydrofobní i hydrofilní, nebo také interakce s polymery. Díky tomu je účinnost koagulace ovlivněna řadou parametrů, především pak složením a koncentrací znečišťujících příměsí, použitým koagulačním činidlem a jeho dávkou, teplotou a pH vody, ale také intenzitou a dobou již zmíněného míchání. Je tedy zřejmé, že optimalizovat takový proces, tj. správně nastavit výše zmíněné parametry, je velmi náročné a že optimalizaci je potřeba provádět neustále s ohledem na měnící se kvalitu vody.

Stěžejním testem sloužícím pro optimalizaci základních technologických parametrů koagulace (flokulace) při úpravě vody je modelová sklenicová zkouška (angl. *jar test*). Tato zkouška je v celosvětovém měřítku používána po dlouhou dobu. První postup byl navržen již v roce 1920 Langelierem a je v různých, mnohdy vzájemně neporovnatelných, modifikacích používán dodnes. Pomocí sklenicové optimalizační zkoušky je možné stanovit vhodný typ a optimální dávku koagulačního činidla, případně i pomocného agregačního činidla, optimální pH, intenzitu a dobu rychlého i pomalého agregačního míchání, sekvenci přidávání jednotlivých činidel atd., aby bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti koagulace, a tedy i odstranění znečišťujících příměsí. V České republice však bohužel provádění sklenicových zkoušek není při provozování úpraven vod součástí běžné praxe a velká část provozovatelů řídí úpravny na základě citu, předchozích zkušeností nebo analogie. Výzkum v oblasti koagulace jako procesu úpravy vody přitom prodělal za posledních cca 30 let značný vývoj a přinesl velké množství nových poznatků, které mnohdy zcela změnily pohled na proces jako takový. K přenosu těchto poznatků do technologické praxe však u nás téměř nedochází, což logicky vede ke stagnaci praxe v úpravě vody.

Předkládaná metodika si klade za cíl podpořit přenos informací z výzkumu do praxe, upozornit na nutnost optimalizace podmínek koagulace (flokulace) a umožnit znovuzavedení laboratorních optimalizací základních technologických parametrů procesu úpravy vody do běžné praxe úpraven vody v ČR.

2. Cíle metodiky

Cílem metodiky je sjednocení postupu laboratorních koagulačních/flokulačních testů, tzv. sklenicových zkoušek, sloužících k optimalizaci konvenční (koagulační) technologie úpravy vody.

Metodika stanovuje postup pro:

1. optimalizace hodnoty pH koagulace/flokulace (určení přídavku činidel pro úpravu pH, případně $KNK_{4,5}$),
2. optimalizace dávky koagulačního činidla,
3. vyhodnocení výsledků laboratorních koagulačních/flokulačních testů,
4. testy agregace umožňující velikostní kategorizaci vzniklých agregátů s ohledem na jejich následný způsob separace.

Metodika poskytuje ucelený postup provádění, vyhodnocování a aplikace laboratorních sklenicových zkoušek vycházející ze současných vědeckých poznatků o procesech koagulace/flokulace. Umožňuje efektivní řízení technologie úpravy vody pomocí koagulace/flokulace v provozech úpraven pitné vody.

3. Popis metodiky

3.1 Princip sklenicové zkoušky

Sklenicová zkouška prováděná v laboratorních podmínkách modeluje průběh procesu tvorby suspenze a slouží k optimalizaci provozních parametrů a ke kontrole a hodnocení provozu stávajících úpraven vody využívajících technologie úpravy vody koagulací/flokulací s následnou separací vytvořených agregátů, ale také k zjištění návrhových parametrů nově budovaných provozů.

Na základě konkrétních požadavků jednotlivých provozů úpraven vody je možné provádět následující testy:

1. optimalizace **dávky koagulačního činidla** za určitých podmínek míchání odpovídajících navrhované nebo stávající technologii,
2. optimalizace **dávky činidla pro předúpravu pH a $KNK_{4,5}$** vody při provozní dávce koagulačního činidla stanovené v bodě 1,
3. optimalizace **podmínek rychlého agregačního míchání** (gradientu rychlosti a doby zdržení) při provozních dávkách činidel stanovených v bodě 2,
4. optimalizace **podmínek pomalého agregačního míchání** (gradientu rychlosti a doby zdržení) pro podmínky stanovené v bodě 3,
5. **zhodnocení a kontrola dávek koagulačního činidla a činidla pro předúpravu** vody za optimalizovaných podmínek rychlého a pomalého agregačního míchání určených v bodech 3 a 4,
6. optimalizace **dávky pomocného flokulačního činidla** za podmínek určených v bodě 5.

Postup sklenicové zkoušky je dán zaměřením optimalizace a parametry, které je třeba optimalizovat. V plném rozsahu bodů 1 až 6 se sklenicová zkouška obvykle provádí pouze při návrhu technologie

pro nově budované úpravny vody, nebo při návrhu rekonstrukcí úpraven stávajících. V běžné praxi provozu úpraven vody, tedy pro optimalizaci a kontrolu provozních parametrů, je sklenicová zkouška prováděna v omezeném rozsahu, obvykle body 1 a 2, které je navíc výhodné spojit do jednoho kroku a optimalizovat zároveň dávku koagulačního činidla i činidla pro předúpravu pH a $KNK_{4,5}$.

Laboratorní sklenicové zkoušky jsou velice dobře využitelné při modelování dávek činidel pro úpravu reakčního pH (bod 2), dávek koagulačních (bod 1) a pomocných agregačních činidel (bod 6) a jejich kontrolu (bod 5). V případě použití některých míchacích reaktorů s definovatelnými hydrodynamickými podmínkami (např. Taylorův-Couetteův reaktor) je jejich použití výhodné i z hlediska sledování vlivu podmínek míchání na charakter vznikajících agregátů (body 3 a 4). Tyto laboratorní testy jsou však omezeně použitelné v případech, kdy je třeba dodržet podobnost modelového zařízení s provozem, tj. např. v situaci, kdy je třeba modelovat podmínky tvorby agregátů s ohledem na jejich separaci konkrétním technologickým postupem (sedimentací, flotací, filtrací). Jedná se například o zjištění vlivu podmínek míchání na charakter vznikajících agregátů a jeho dopad na průběh filtračních cyklů. V takovém případě je nutné provést kontinuální modelová měření na průtočných poloprovozních modelových zařízeních, která splňují některá kritéria technologické podobnosti s vlastním provozem. Pomocí poloprovozních modelových zařízení je možné simulovat podmínky homogenizace, rychlého a pomalého agregačního míchání i jednostupňové a dvoustupňové separace. Z tohoto důvodu nejsou testy uvedené v bodech 3 a 4 předmětem této metodiky.

Optimalizaci provozních parametrů úpravy vody je nutné provádět při každé změně kvality surové vody, např. změně pH, $KNK_{4,5}$, hodnot zákalu, koncentrace organických látek – TOC, DOC, $CHSK_{Mn}$, koncentrace manganu, UV_{254}, optické hustoty, počtu buněk mikroorganismů atd. V těchto případech se ve vodárenské praxi obvykle jedná o optimalizaci reakčních podmínek koagulace, tj. dávky koagulačního činidla a hodnoty pH, při které koagulace probíhá. Nicméně i v těchto případech je nutné zajistit, aby sklenicová zkouška respektovala způsob úpravy vody v daném provozu. Jedná-li se například o dvoustupňovou separaci suspenze sedimentací a filtrací, je nutné modelovat pomalé agregační míchání s potřebnou dobou zdržení a následně také sedimentaci a filtraci vzniklé suspenze.

Dále je nutné mít na paměti, že podmínky míchání použité pro sklenicovou zkoušku musí odpovídat skutečným podmínkám koagulace/flokulace na úpravně. Důležité je dodržet především čas rychlého a pomalého agregačního míchání, které musí odpovídat reálným dobám zdržení v provozu úpravny vody. Velmi vhodné je také dodržet, alespoň přibližně, hodnoty aplikovaných gradientů rychlosti. Pokud nejsou známé reálné provozní hodnoty intenzit míchání (gradientů rychlosti), je třeba je určit (změřit). V dalším kroku je třeba tyto na úpravně vody reálně používané hodnoty gradientů rychlosti transformovat na hodnoty odpovídající míchadlům používaným při sklenicové zkoušce, viz kap. 3.3. Pokud však z nějakého důvodu není možné zjistit hodnoty gradientů rychlosti aplikovaných na úpravně vody, je nutné zajistit následující sled míchání a aplikovat doporučené gradienty rychlosti:

1. homogenizační míchání (G = 300–500 s^{-1}, doba zdržení 30–60 s)
2. rychlé agregační míchání (G = 100–200 s^{-1}, doba zdržení dle požadavků provozu)

3. pomalé agregační míchání (G = 30–60 s^{-1} pro hlinitá koagulační činidla, G = 50–80 s^{-1} pro železitá koagulační činidla, doba zdržení dle požadavků provozu)

Ne vždy nutně musí po rychlém agregačním míchání následovat pomalé agregační míchání. Takový případ může nastat, simulujeme-li podmínky jednostupňové separace suspenze pomocí tzv. koagulační filtrace. V takovém případě je aplikováno pouze rychlé agregační míchání po dobu odpovídající reálným podmínkám provozu a následně pokus ukončen a vyhodnocen, viz dále. Je také nutné si uvědomit, že pokud jsou simulovány podmínky používané na konkrétní úpravně vody, musí být sklenicové zkoušky prováděny s použitím identických činidel, která musí být aplikována ve stejné formě, stejném pořadí a ve stejném časovém intervalu jako na dané úpravně. Při sklenicové zkoušce je třeba zabezpečit provádění pokusu při teplotě vody odpovídající teplotě surové vody přitékající na úpravnu, protože rozdílná teplota může významně ovlivnit průběh zkoušky. Teplota ovlivňuje především rychlost disociace molekul koagulačního činidla a následnou rychlost hydrolýzy Al nebo Fe včetně příslušných dílčích polymerizačních reakcí, a tím i rychlost a účinnost mechanizmů interakcí koagulujících složek.

3.2 Laboratorní vybavení ke sklenicové zkoušce

K optimalizaci podmínek koagulace a flokulace při úpravě vody se používá následující vybavení a materiál (chemikálie):

1. Vícemístná míchací kolona

Míchací kolona (obr. 1) musí být uzpůsobena pro umístění 1–2litrových reakčních nádob a vybavena vhodnými míchadly na každé pozici, viz kap. 3.3, počítadlem otáček, nastavitelným časovým spínačem a ovladačem rychlosti umožňujícím změnu intenzity míchání v rozsahu gradientu rychlosti cca G = 10–500 s^{-1} (v závislosti na použitém míchadle). Běžně jsou v praxi používány šestimístné míchací kolony, mnohem výhodnější je ale s ohledem na přesnost určení dávky činidel použití osmi- nebo desetimístných.

Obr. 1: Míchací kolona LMK 8 (ÚH AV ČR, v. v. i.)

2. Reakční nádoby (kádinky, sklenice)

Reakční nádoby by měly mít kruhový průřez kvůli zajištění rovnoměrné distribuce gradientu rychlosti, na rozdíl od někdy používaných nádob se čtvercovým průřezem. Všechny reakční nádoby musí mít stejný průměr, tvar, objem a musí být bez vnitřních nerovností. Optimální jsou dvoulitrové sklenice s průměrem cca 10 cm a příslušnou výškou, tj. 25,5 cm, zvětšenou o cca 4–5 cm. Na podstavě míchací kolony by měly být vyznačené pozice pro jednotlivé nádoby pro zajištění umístění míchadel v jejich středu.

3. Roztoky činidel

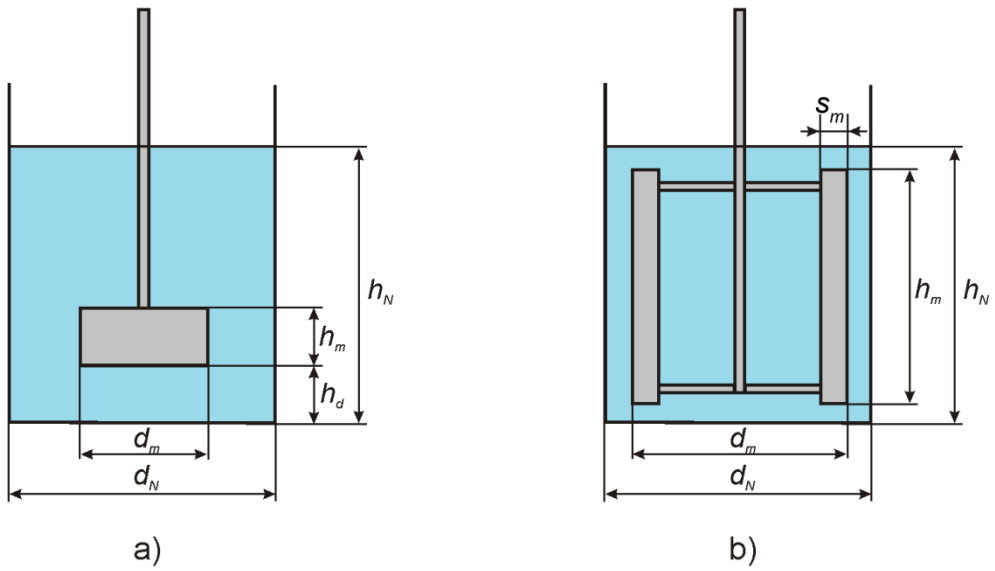
Jedná se o činidla pro předúpravu reakčního (koagulačního) pH, koagulační činidla, případně pomocná agregační činidla. Pro úpravu pH do alkalické oblasti se obvykle používá vápenná voda (nasycený roztok $Ca(OH)_2$) nebo hydroxid sodný (NaOH), pro okyselení obvykle kyselina sírová (H_2SO_4). $KNK_{4,5}$ je možné upravit pomocí hydrogenuhličitanu sodného – sody ($NaHCO_3$). Z hydrolyzujících koagulačních činidel se nejčastěji používají síran hlinitý ($Al_2(SO_4)_3$) a chlorid nebo síran železitý ($FeCl_3$, resp. $Fe_2(SO_4)_3$), případně již částečně předpolymerizovaná činidla jako např. polyaluminium chlorid (PACl). Jako pomocná flokulační činidla jsou využívány především syntetické polymery na bázi polyakrylamidu nebo polyetyleniminu (např. Magnafloc či Zetag). Roztoky činidel musí být čerstvě připraveny před začátkem testů z chemikálií používaných na úpravně. Koncentrace dávkovaných činidel by měla zaručovat jejich stabilitu a zároveň co možná nejvyšší přesnost dávkování. Pro hydrolyzující koagulační činidla se doporučuje použití 1% roztoku (hmotnostní zlomek roztoku = 0,01). Postup přípravy a ředění roztoků koagulačních činidel a činidel pro předúpravu pH (včetně výpočtů) je uveden v přílohách 10.6 až 10.9.

4. Doplňkové laboratorní vybavení

Mezi další potřebné vybavení patří laboratorní odstředivka s výkyvným rotorem, poloměrem otáčení 90 mm a nastavitelnými otáčkami alespoň do 4000 rpm. Vhodný objem kyvet je 150 ml a více. Dalším potřebným vybavením jsou běžné potřeby pro laboratorní praxi (pipety, kádinky, odměrné baňky, pH metr, analytika pro sledované ukazatele kvality vody atd.).

3.3 Míchadla pro sklenicové zkoušky a způsob stanovení intenzity míchání

Nejpoužívanějšími míchadly pro sklenicové zkoušky jsou *rotační mechanická míchadla*: typ s jednou horizontální lopatkou – *listové míchadlo* (obr. 2a) a typ se dvěma vertikálními lopatkami – *rámové míchadlo* (obr. 2b). Jako reakční nádoby se používají válcové sklenice obvykle bez narážek.



Obr. 2: Rotační mechanická míchadla: a) typ s jednou horizontální lopatkou – *listové míchadlo*, b) typ se dvěma vertikálními lopatkami – *rámové míchadlo*

Intenzitu míchání charakterizovanou hodnotou středního gradientu rychlosti $\overline{G}$ je možné určit za předpokladu, že je znám příkon míchadla *P*. Platí, že:

$$\bar{G} = \sqrt{\frac{P}{V\eta}} \ , \tag{1}$$

kde *P* je příkon míchadla, *V* je objem kapaliny (vody), η je dynamická viskozita.

Existuje několik možností, jak určit příkon míchadla. Nejpřesnějším z nich je stanovení závislosti krouticího momentu *M* konkrétního míchadla na jeho frekvenci. Příkon míchadla *P* se vypočte ze vztahu

$$P = \omega M = 2\pi f M \ , \tag{2}$$

kde ω je úhlová rychlost, *M* je krouticí moment a *f* je frekvence míchadla.

V případě, že není k dispozici míchací zařízení umožňující měření krouticího momentu, je třeba příkon míchadla vypočítat ze vztahu pro příkonové číslo *Po*

$$Po = \frac{P}{d_m^5 f^3 \rho_f} \ , \tag{3}$$

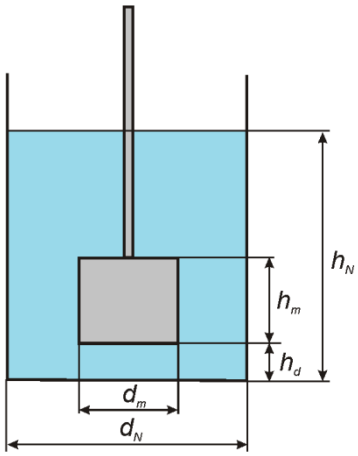
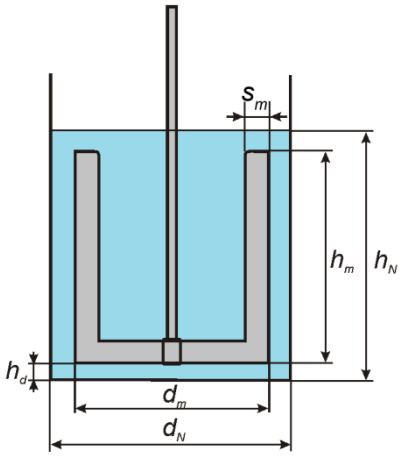
kde *P* je příkon na hřídeli míchadla, d_m je průměr míchadla, *f* je frekvence míchadla a ρ_f je hustota vody.

Charakteristiky pro stanovení příkonového čísla *P*o listového a kotvového míchadla, která jsou obvykle nejčastěji používána při sklenicových zkouškách, jsou uvedeny v tab. 3.1. Pro stanovení příkonového čísla *Po* těchto míchadel lze použít univerzální korelační rovnici

$$Po = \left[\left(\frac{A_1}{Re}\right)^{A_2} + \frac{A_3}{Re^{\left(A_4 Re^{A_5}\right)}} + A_6\right]^{1/A_2} \text{ pro } Re < 2\cdot 10^4, \tag{4}$$

kde A_1–A_6 jsou empiricky zjištěné konstanty vázané na konkrétní geometrii a rozměry míchadla uvedené v tab. 3.1 a $Re = \frac{\rho_f v d_m}{\eta}$ (ρ_f je hustota kapaliny, v je rychlost proudění kapaliny, d_m je průměr míchadla a η je dynamická viskozita kapaliny).

Tab. 3.1: Charakteristiky vybraných míchadel vhodných pro sklenicové optimalizační zkoušky

Míchadlo	Schéma	Geometrické parametry	Konstanty
Listové míchadlo		$d_N/d_m = 2$ $h_m/d_m = 1$	$A_1 = 115$ $A_2 = 1{,}619$ $A_3 = 91{,}88$ $A_4 = 0{,}457$ $A_5 = 0$ $A_6 = 0$
Kotvové míchadlo		$d_N/d_m = 1{,}11$ $h_m/d_m = 0{,}8$ $s_m/d_m = 0{,}12$ $h_d/d_m = 0{,}055$	$A_1 = 180$ $A_2 = 1{,}463$ $A_3 = 20{,}80$ $A_4 = 0{,}438$ $A_5 = 0$ $A_6 = 0$

3.4 Pracovní postup sklenicové zkoušky

Sklenicovou optimalizační zkoušku je možné provádět v řadě modifikací v závislosti na optimalizovaných parametrech. Zcela zásadními parametry ovlivňujícími průběh destabilizace a následné agregace nežádoucích znečišťujících příměsí obsažených v surové vodě a tím i celou účinnost úpravy vody jsou reakční pH a dávka koagulačního činidla (body 1 a 2 v kap. 3.1). V praxi často aplikovaným postupem je nejprve stanovení optimální dávky koagulačního činidla dávkováním odstupňovaných dávek činidla bez kontroly hodnoty pH. Následně je zjištěna optimální hodnota pH koagulací v určitém rozsahu hodnot pH pro zjištěnou optimální dávku. Tento

postup sice může vést ke kvalitním výsledkům, nicméně skrývá jeden podstatný nedostatek. Vzhledem k tomu, že hydrolyzující koagulační činidla (a částečně i činidla předpolymerizovaná) snižují pH a $KNK_{4,5}$ surové vody v závislosti na jejich nadávkovaném množství, není jednoznačné, zda nejvyšší účinnosti odstranění při zjištěné optimální dávce bylo dosaženo díky aplikaci vhodné dávky použitého činidla, nebo díky tomu, že při této dávce bylo dosaženo právě vhodného reakčního pH. Proto se jako exaktnější postup jeví souběžné testování dávky koagulačního činidla i reakčního pH. Ten je nutné provést ve dvou krocích, kdy je nejdříve titrací zjištěn vliv dávky koagulačního činidla na změnu pH a tedy množství činidel (vápenná voda, jedlá soda, kyselina, hydroxid, viz kap. 3.2) potřebných k úpravě pH na zkoumané hodnoty. Ve druhé fázi jsou provedeny koagulační testy pro jednotlivé dávky koagulačního činidla ve zkoumaném rozsahu pH. Schéma tohoto v praxi nejčastěji využitelného postupu sklenicové optimalizační zkoušky je znázorněno na obr. 3.

3.4.1 Optimalizace dávky činidel pro úpravu reakčního pH a dávky koagulačního činidla

Vzory tabulek pro záznam testů stanovení dávek činidel pro předúpravu reakčního pH a stanovení optimální dávky koagulačního činidla a reakčního pH jsou uvedeny v příloze 10.4.

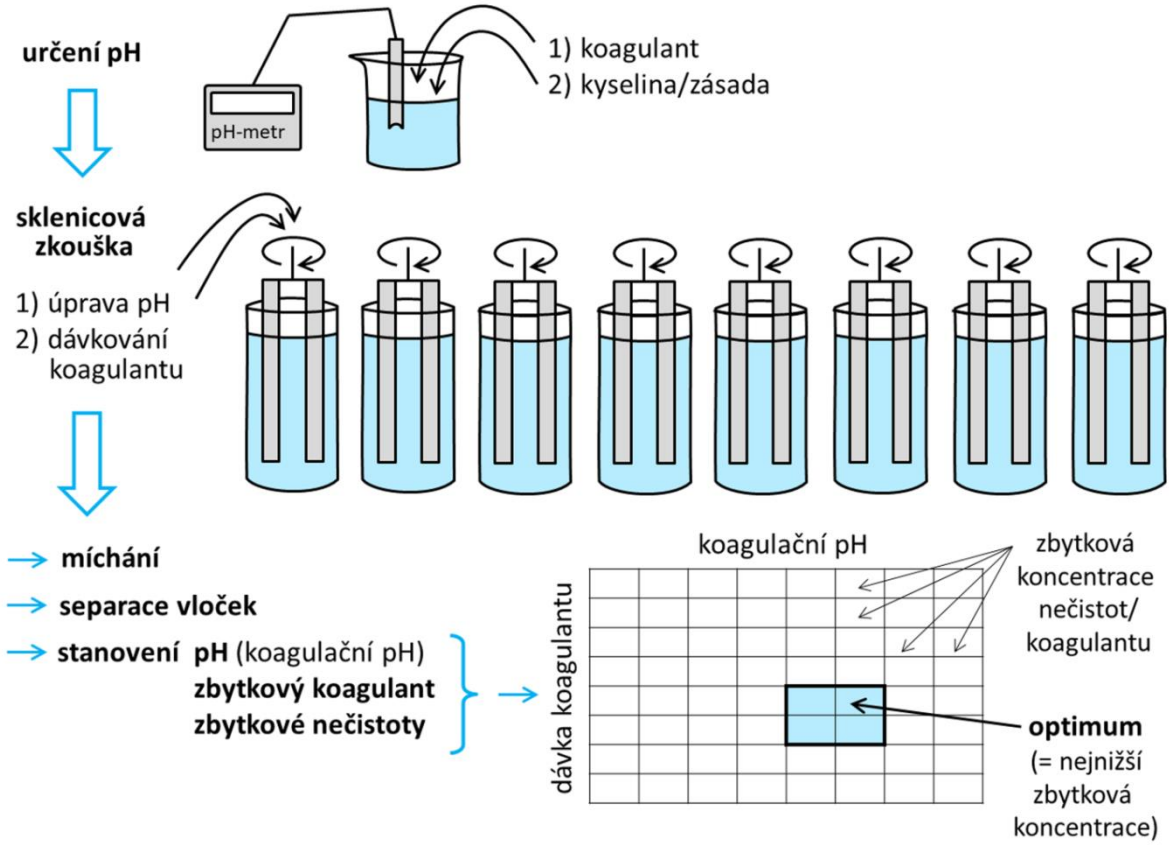
A) Stanovení dávek činidel pro úpravu reakčního pH titrací:

1. Ke vzorku surové vody přidat vybranou dávku koagulačního činidla, vzorek míchat a současně měřit hodnotu pH.
2. Po ustálení hodnoty pH za průběžného míchání ke vzorku přidávat kyselinu nebo zásadu pro úpravu pH (u vod s nízkou $KNK_{4,5}$ lze nejprve přidávat sodu ke zvýšení jejích hodnot) a zapisovat změny hodnoty pH s přídavky kyseliny/zásady po určitém intervalu (např. 0,5 nebo 0,25 ml). Zjištěná množství kyseliny/zásady budou pak dávkována do surové vody před koagulačními testy k dosažení požadovaných výsledných hodnot pH.
3. Opakovat tento postup pro každou testovanou dávku koagulačního činidla (pro zvolený rozsah testovaných dávek – odvíjí se od předchozích zkušeností, studií atd.).

B) Stanovení optimální dávky koagulačního činidla a hodnoty reakčního pH:

1. Očíslované reakční nádoby z větší části naplnit surovou vodou.
2. Nadávkovat do vody v reakčních nádobách činidla pro úpravu pH podle předem provedených titrací tak, že v každé reakční nádobě bude po sklenicové zkoušce jiné výsledné pH a všechny nádoby tak budou pokrývat vybraný rozsah pH (zvolený rozsah pH a tedy i množství reakčních nádob se odvíjí od předchozích zkušeností, studií atd.). Činidla v nádobách krátce rozmíchat.
3. Do reakčních nádob doplnit surovou vodu k dosažení požadovaného testovaného objemu.
4. Přidat koagulační činidlo – do všech reakčních nádob stejnou dávku. Koagulační činidlo dávkovat i do kontrolního vzorku vody bez znečišťujících příměsí (např. demineralizované vody) za účelem kontroly koncentrace nadávkovaného koagulačního činidla.
5. Ihned po dávkování koagulačního činidla zahájit *homogenizační míchání* (t_{HM} = 30–60 s) následované *rychlým agregačním mícháním* odpovídajícím požadované hodnotě gradientu rychlosti (G_{RM}) a míchat po požadovanou dobu rychlého agregačního míchání (t_{RM}).

6. Po uplynutí doby určené pro rychlé agregační míchání přenastavit otáčky míchadel pro *pomalé agregační míchání* odpovídající požadované hodnotě gradientu rychlosti (G_{PM}) a míchat po požadovanou dobu pomalého agregačního míchání (t_{PM}).
7. Po dokončení pomalého míchání a separaci agregátů (viz kap. 3.4.2) odebrat z každé reakční nádoby vzorek vody a změřit v něm následující parametry: pH, $KNK_{4,5}$, zbytkovou koncentraci koagulačního činidla (v případě hydrolyzujících a předpolymerizovaných činidel koncentraci Fe nebo Al) a parametry charakterizující znečišťující látku/látky – zákal v případě znečištění anorganickými částicemi, $CHSK_{Mn}$, DOC, případně podrobnější analýzy organických látek (např. pesticidů, sinicových toxinů apod.) v případě znečištění organickými látkami (u huminových látek lze použít i UV_{254}), počty buněk, případně optickou hustotu v případě buněk mikroorganismů atd.
8. Opakovat body 1–7 pro každou testovanou dávku koagulačního činidla.



Obr. 3: Schéma sklenicové optimalizační zkoušky a jejího vyhodnocení

3.4.2 Separace agregátů při sklenicových zkouškách

Způsob separace agregátů před měřením výše jmenovaných parametrů závisí na tom, jaká reálná separace je používána přímo v provozu úpravny vody – zda se jedná o jednostupňovou separaci přímou filtrací, nebo dvoustupňovou separaci sedimentací s následnou filtrací. Hodnoty parametrů charakterizujících kvalitu upravené vody po sedimentaci jsou měřeny ve vzorcích odebraných

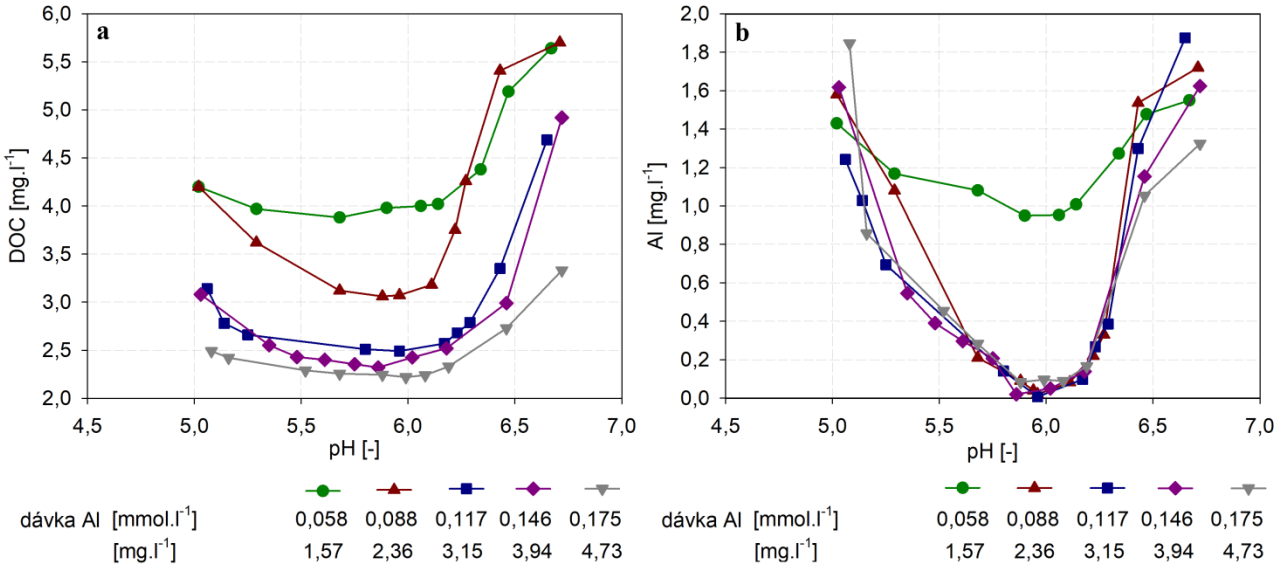
po 60 minutách usazování (stanovení C_{60}, lze určit i jinou dobu usazování) od ukončení pomalého agregačního míchání. Hodnoty vyjadřující kvalitu vody odpovídající separaci agregátů přímou filtrací jsou měřeny po odstředění, které proběhlo ihned po ukončení pomalého agregačního míchání (stanovení C_0). Hodnoty vyjadřující kvalitu vody odpovídající separaci agregátů sedimentací s následnou filtrací jsou měřeny ve vzorcích odebraných po 60 minutách sedimentace a po následném odstředění (stanovení $C_{F(60)}$). V případě optimalizace dávky pomocného flokulačního činidla se vždy provádí separace sedimentací a následným odstředěním.

Odstředění je nutné provádět za přesně definovaných podmínek na odstředivce s výkyvným rotorem při odstředivé rychlosti 3500 rpm = 1996 x g po dobu 20 minut. Vyšší otáčky ani delší doba odstřeďování nad uvedené hodnoty nemá na zbytkové koncentrace hodnocených parametrů žádný vliv. Charakter suspenze vzniklé při sklenicové zkoušce lze posuzovat pomocí testu agregace, který umožňuje rozdělení vzniklých agregátů na základě jejich sedimentačních rychlostí do čtyř kategorií – neagregované částice (NA), primární agregáty (PR), mikro-agregáty (MI) a makro-agregáty (MA), které se výrazně liší svým charakterem a tedy i způsobem separace, viz kap. 3.5. V případě jednostupňové separace přímou (koagulační) filtrací je test agregace prováděn po ukončení rychlého míchání (čas t_{RM}). Pokud se proces úpravy optimalizuje pro dvoustupňovou separaci suspenze, test agregace je proveden po pomalém agregačním míchání (čas $t_{RM} + t_{PM}$).

3.4.3 Zpracování dat a vyhodnocení sklenicové zkoušky

Vzorové zpracování dat sklenicové optimalizační zkoušky je uvedeno v příloze 10.5. Výsledky sklenicové zkoušky je nejvýhodnější znázorňovat ve formě grafů, případně matic, popisujících závislost zbytkových koncentrací účinné složky (Al/Fe) koagulačního činidla a zbytkových koncentrací odstraňovaných znečišťujících příměsí (zákal, $CHSK_{Mn}$, TOC atd.) na pH při různých dávkách koagulačních činidel, viz obr. 4 a 5. Z grafických výstupů je zřejmý výsledek sklenicových zkoušek – optimální dávka koagulačního činidla a rozsah reakčního pH. Optimální je taková dávka koagulačního činidla, při které dochází k účinné koagulaci znečišťujících příměsí a je dosaženo maximálního snížení obsahu sledovaného parametru (zbytkové činidlo Al/Fe, $CHSK_{Mn}$, DOC, zákal, atd.). Oblast v okolí této dávky je oblast optima, kde se účinnost koagulace významně neliší. V rámci oblasti optimálních dávek koagulačního činidla je pak třeba určit vhodnou provozní dávku. Z ekonomického hlediska je pochopitelně výhodné použít minimální účinnou dávku. Provozní dávka koagulačního činidla by však neměla být volena na hranicích intervalu účinné úpravy vody, kdy např. malá změna v kvalitě surové vody může způsobit, že destabilizace nebude probíhat v oblasti optima a dojde ke zvýšení zbytkových koncentrací jednotlivých ukazatelů. Provozní dávku je pak obvykle výhodné volit kolem středu případně v dolní polovině oblasti účinné destabilizace.

Optimální rozsah hodnot pH se může lišit (a zpravidla se liší) pro znečišťující příměs/i a koagulační činidlo. Provozní hodnota pH pak musí pochopitelně zohledňovat všechny příslušné hodnocené ukazatele a měla by být volena tam, kde dochází k nejúčinnějšímu odstranění nejen znečišťující příměsi, ale i koagulačního činidla, případně pomocných činidel. Pro orientaci, kde se při koagulaci určitých typů vod s největší pravděpodobností bude pohybovat předpokládané reakční pH, je možné vycházet z obrázků 4 a 5.



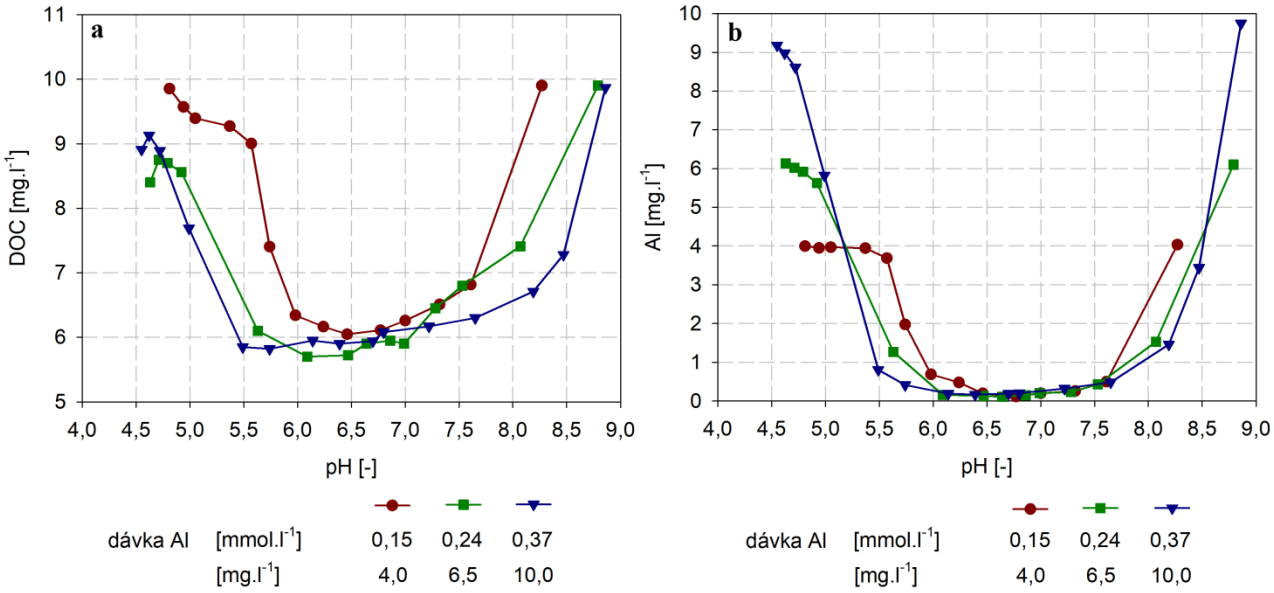
c **Průměrná účinnost odstranění DOC (%) - síran hlinitý**

dávka Al (mmol·l⁻¹)	pH (-) 5,0-5,2	5,2-5,5	5,6-5,8	5,8-5,9	5,9-6,1	6,1-6,2	6,2-6,3	6,3-6,4	6,4-6,5	6,6-6,7
0,058	38	42	43	41	41	41	38	36	24	17
0,088	38	47	54	55	55	53	45	35	20	16
0,017	54	61	62	63	63	62	61	59	51	31
0,146	55	62	65	66	64	63	61	59	56	28
0,175	63	65	67	67	67	66	65	62	60	51
%	70	67	65	60	55	50	40	30	20	15

d **Průměrné zbytkové koncentrace Al (mg·l⁻¹) - síran hlinitý**

dávka Al (mmol·l⁻¹)	pH (-) 5,0-5,2	5,2-5,5	5,6-5,8	5,8-5,9	5,9-6,1	6,1-6,2	6,2-6,3	6,3-6,4	6,4-6,5	6,6-6,7
0,058	1,43	1,17	1,08	0,95	0,95	1,01	1,13	1,27	1,48	1,55
0,088	1,58	1,08	0,21	0,09	0,02	0,08	0,22	0,33	1,54	1,72
0,017	1,24	0,69	0,14	0,10	0,01	0,10	0,27	0,39	1,30	1,87
0,146	1,62	0,55	0,30	0,02	0,05	0,14	0,31	0,75	1,15	1,62
0,175	1,85	0,86	0,28	0,08	0,10	0,17	0,29	0,69	1,05	1,32
0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1	1,2	1,4	1,6	1,8

Obr. 4: Vyhodnocení sklenicových zkoušek – koagulace přírodní vody s obsahem huminových látek (DOC = 6,8 mg·l^{-1}) síranem hlinitým: a) závislost zbytkové koncentrace organických látek (vyjádřené jako DOC) na hodnotě pH pro různé dávky koagulačního činidla, b) závislost zbytkové koncentrace koagulačního činidla (vyjádřené jako obsah Al) na hodnotě pH pro různé dávky koagulačního činidla, c) matice sestavená z dat znázorněných v grafu a) vyjadřující účinnost odstranění organických látek (DOC) – rámeček vyznačuje nejvyšší hodnoty odpovídající oblasti optimálních hodnot pH a dávek koagulačního činidla a d) matice sestavená z dat znázorněných v grafu b) vyjadřující koncentraci zbytkového hliníku – rámeček vyznačuje nejnižší hodnoty odpovídající oblasti optimálních hodnot pH a dávek koagulačního činidla



c Průměrná účinnost odstranění DOC (%) - síran hlinitý

dávka Al (mg·l^{-1})	pH (-) 4,8	4,94	5,05	5,37	5,57	5,74	6	6,24	6,46	6,77	7	7,32	7,61	8,27
4,0	1	4	6	7	10	26	37	38	40	39	37	35	32	1
6,5	13	14	19	30	39	41	43	43	43	41	41	36	31	12
10,0	11	21	25	36	42	42	42	41	41	39	39	38	37	29
%			45	43	41	39	37	31	19	14	6	1		

d Průměrné zbytkové koncentrace Al (mg·l^{-1}) - síran hlinitý

dávka Al (mg·l^{-1})	pH (-) 4,8	4,94	5,05	5,37	5,57	5,74	6	6,24	6,46	6,77	7	7,32	7,61	8,27
4	4,00	3,95	3,97	3,95	3,69	1,98	0,69	0,48	0,20	0,12	0,20	0,26	0,50	4,04
6,5	5,92	5,50	4,82	2,86	1,63	1,27	0,16	0,15	0,13	0,13	0,20	0,23	0,43	2,82
10	8,61	6,35	5,82	2,02	0,69	0,41	0,28	0,18	0,17	0,19	0,25	0,36	0,48	2,02
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	1,0	1,6	2,0	3,0	4,0	4,8	5,5	6,5	8,6

Obr. 5: Vyhodnocení sklenicových zkoušek – koagulace vody s obsahem buněčných organických látek sinice *Microcystis aeruginosa* (DOC = 9,9 mg·l^{-1}) síranem hlinitým: a) závislost zbytkové koncentrace organických látek (vyjádřené jako DOC) na hodnotě pH pro různé dávky koagulačního činidla, b) závislost zbytkové koncentrace koagulačního činidla (vyjádřené jako obsah Al) na hodnotě pH pro různé dávky koagulačního činidla, c) matice sestavená z dat znázorněných v grafu a) vyjadřující účinnost odstranění organických látek (DOC) – rámeček vyznačuje nejvyšší hodnoty odpovídající oblasti optimálních hodnot pH a dávek koagulačního činidla a d) matice sestavená z dat znázorněných v grafu b) vyjadřující koncentraci zbytkového hliníku – rámeček vyznačuje nejnižší hodnoty odpovídající oblasti optimálních hodnot pH a dávek koagulačního činidla

3.5 Test agregace

Test agregace je jednoduchým a rychlým postupem hodnocení účinnosti koagulace stanovením podílu neagregovaných příměsí/činidel, ale také posouzením vlastností vzniklých agregátů na základě jejich sedimentačních rychlostí. Test agregace nachází uplatnění nejen při vyhodnocování sklenicových optimalizačních testů, ale lze jej využít i k posouzení flokulace (agregace) v rámci jednotlivých částí technologické linky úpravny vody, např. po míchání, v rámci sedimentační nádrže, nad filtry atd. Nespornou výhodou testu agregace jsou jeho nízké nároky na přístrojové vybavení, které se skládá pouze z odstředivky a vybavení pro analýzu sledované

složky – koagulačního činidla (např. Al/Fe) a odstraňované znečišťující příměsi (např. TOC), viz kap. 3.2.

Test agregace je založený na rozdílné sedimentační rychlosti částic/agregátů tvořících koagulující suspenzi, které můžeme rozdělit na *neagregované částice* (*NA*), *primární agregáty* (*PR*), *mikro-agregáty* (*MI*) a *makro-agregáty* (*MA*). Jejich vlastnosti a vhodný způsob jejich separace jsou uvedeny v tab. 3.2. Protože test agregace slouží k posouzení stavu vývoje agregátů v určitém okamžiku sledování, byla metodika modifikována tak, aby byly vyloučeny vlivy vertikální agregace probíhající v systémech obsahujících vločkovité agregáty. Tam, kde probíhá usazování v tíhovém poli relativně krátkou dobu, jsou vzorky pro analytické zpracování odebírány z hloubky 40 mm pod hladinou. Tam, kde by byla doba sedimentace v tíhovém poli neúměrně dlouhá, je nahrazena sedimentací v poli odstředivém a pro analytické sledování je odebírán vzorek po odstředění. Jednotlivé kategorie částic jsou definovány následovně:

Neagregovaný podíl částic (*NA*) v podstatě odpovídá neodstranitelnému podílu částic/molekul a je stanovován jako poměr koncentrace sledované složky určité příměsi (např. Al, Fe, TOC atd.) v odstředěném vzorku po 60 minutách usazování ($C_{F(60)}$) k celkové koncentraci sledované složky stanovené v počátku sedimentace (C_0)

$$P_{NA} = \frac{C_{F(60)}}{C_0}\,. \tag{5}$$

Primární agregáty (PR) jsou odstranitelné agregáty (např. přímou filtrací), jejichž doba sedimentace je delší než 60 minut. Podíl primárních agregátů je stanovován jako poměr rozdílu koncentrace sledované složky určité příměsi po 60 minutách sedimentace (C_{60}) a koncentrace sledované složky v odstředěném vzorku po 60 minutách sedimentace ($C_{F(60)}$) k celkové koncentraci sledované složky stanovené v počátku sedimentace (C_0)

$$P_{PR} = \frac{C_{60} - C_{F(60)}}{C_0}\,. \tag{6}$$

Mikro-agregáty (MI) jsou agregáty, které jsou odstranitelné prostou sedimentací v časovém rozmezí mezi 5 až 60 minutami. Jejich podíl je stanovován jako poměr rozdílu koncentrace sledované složky stanovené ve vzorcích po 5 a 60 minutách sedimentace (C_5 – C_{60}) k celkové koncentraci sledované složky stanovené v počátku sedimentace (C_0)

$$P_{MI} = \frac{C_5 - C_{60}}{C_0}\,. \tag{7}$$

Makro-agregáty (MA) jsou agregáty, které jsou odstranitelné prostou sedimentací v době kratší než 5 minut. Jejich podíl v systému je stanovován jako poměr rozdílu celkové koncentrace sledované složky stanovené v počátku sedimentace (C_0) a ve vzorku odebraném po 5 minutách sedimentace (C_5) k celkové koncentraci sledované složky stanovené v počátku sedimentace (C_0)

$$P_{MA} = \frac{C_0 - C_5}{C_0}\,. \tag{8}$$

Tab. 3.2: Charakteristika jednotlivých typů agregátů, určení jejich podílu v suspenzi a vhodné separační technologie

Název skupiny	Velikost agregátů	Další vlastnosti agregátů	Charakteristika agregátů z hlediska testu agregace	Podíl agregátů – výpočet [1]	Vhodná separační technologie	Popis technologie a probíhající procesy
Makro-agregáty	> 1 mm	Je patrný zákal, stejně jako u mikro-agregátů, ale morfologické vlastnosti se liší.	Částice, které se usadí v kratším čase než 5 min.	$P_{MA} = \frac{C_0 - C_5}{C_0}$	Sedimentace a filtrace	Homogenizace koagulačního činidla, tvorba *mikro-* a *makro-agregátů* během rychlého a pomalého agregačního míchání, sedimentace vytvořených agregátů a separace zbývajících částic na filtru.
Mikro-agregáty	0,05–1 mm	Objevuje se zákal. Převládá ortokinetický pohyb.	Částice, které se usadí v čase mezi 5 a 60 min.	$P_{MI} = \frac{C_5 - C_{60}}{C_0}$	Dvoustupňová filtrace (čiření a filtrace)	Homogenizace koagulačního činidla, současná agregace a filtrace *mikro-agregátů* v dokonale vznášeném vločkovém mraku (obvykle v čiřiči) a separace zbývajících částic na filtru.
Primární agregáty	0,005–0,05 mm	Objevuje se opalescence. Převládá ortokinetický pohyb.	Částice, které se usadí v čase mezi 60 a 440 min. Dlouho trvající sedimentace v gravitačním poli byla nahrazena sedimentací v odstředivém poli.	$P_{PR} = \frac{C_{60} - C_{F(60)}}{C_0}$	Přímá filtrace	Homogenizace koagulačního činidla, tvorba *primárních agregátů* v rychle míchané nádrži, nátok na filtr. Adheze destabilizovaných částic na povrchu filtračního materiálu.
Neagregovaný podíl	< 0,005 mm	Neovlivňují světelný paprsek procházející systémem. Převládá perikinetický pohyb.	Částice, které nejsou ovlivněny gravitačním polem a neusadí se ani po velmi dlouhé době.	$P_{NA} = \frac{C_{F(60)}}{C_0}$	Koagulační (agregační) filtrace	Homogenizace koagulačního činidla a okamžitý nátok vody na filtr. Adheze destabilizovaných částic na povrchu filtračního materiálu.

[1] C_0 je celková počáteční koncentrace hliníku nebo železa na začátku sedimentace, C_5 a C_{60} jsou koncentrace po 5 a 60 minutách sedimentace a $C_{F(60)}$ je koncentrace po odstředění (3500 rpm = 1996 x g, 20 min). Podmínky odstředění byly určeny testováním suspenzí za různých podmínek (otáčky a čas). Se zvyšujícími se otáčkami a prodlužováním doby nad uvedené hodnoty se neagregovaný podíl již dále neměnil.

3.5.1 Pracovní postup testu agregace

1. Provést sklenicovou optimalizační zkoušku popsanou v kapitole 3.4.1 (Optimalizace dávky činidel pro úpravu reakčního pH a dávky koagulačního činidla) až do bodu 6 včetně.
2. Po ukončení míchání (čas t_0) odebrat z každé reakční nádoby vzorky na stanovení základní složky koagulačního činidla (Al/Fe) – koncentrace C_0.
3. Zahájit usazování agregátů v reakčních nádobách.
4. Po 5 minutách (čas t_5) usazování odebrat z každé reakční nádoby vzorky na stanovení základní složky koagulačního činidla (Al/Fe) – koncentrace C_5.
5. Po 60 minutách (čas t_{60}) usazování odebrat z každé reakční nádoby vzorky na stanovení základní složky koagulačního činidla (Al/Fe) – koncentrace C_{60}
6. Bezprostředně (čas t_{60}) po odběru vzorků popsaných v bodě 5 odebrat vzorky na stanovení základní složky koagulačního činidla (Al/Fe) upravené odstřeďováním – koncentrace $C_{F(60)}$.
7. Odebrat vzorky pro ostatní sledované parametry (pH, $KNK_{4,5}$, $CHSK_{Mn}$, TOC atd.), viz kap. 3.4.1 (Optimalizace dávky činidel pro úpravu reakčního pH a dávky koagulačního činidla), bod 7.

Odběry všech vzorků pro stanovení koncentrací Al/Fe (C_0, C_5 a C_{60}) se provádějí v průběhu sedimentace přímo v reakčních nádobách pipetou vždy z hloubky 40 mm pod hladinou. Odstřeďování probíhá za podmínek jako při klasické sklenicové optimalizační zkoušce popsané výše, tedy v odstředivce s výkyvným rotorem při odstředivé rychlosti 3500 rpm = 1996 x g po dobu 20 minut.
Poměrné zastoupení částic/agregátů se určí ze vztahů (5–8). Výsledky se porovnají s tab. 3.2, která popisuje odpovídající vlastnosti tvořených agregátů a optimální způsob jejich separace.

4. Novost postupů a přínos metodiky laboratorních koagulačních/flokulačních testů

Přesto, že by metoda sklenicové optimalizační zkoušky měla být standardním nástrojem pro optimalizaci koagulace/flokulace, neexistuje její jednotná metodika. Protože podmínky pracovního postupu sklenicové zkoušky nejsou přesně definovány a jsou voleny v převážné většině případů více méně náhodně, jsou v praxi používané postupy prováděny nesprávně a způsobem, který nezohledňuje potřeby provozu. Dosažené výsledky sklenicových testů pak v mnoha případech neumožňují optimalizovat používané technologické postupy. V důsledku těchto skutečností se provozovatelé úpraven vody vesměs rozdělili na dvě skupiny: 1) provozovatele, kteří se snaží o vytvoření vlastní modifikace sklenicové zkoušky vyhovující podmínkám jejich provozu a 2) ty, kteří sklenicovou zkoušku opustili a začali řídit provoz úpravny na základě citu, předchozích zkušeností nebo analogie. Provozovatelů náležejících do druhé skupiny je v celosvětovém měřítku nepochybně více. V ČR je dnes tímto způsobem řízeno přes 90% všech úpraven vody.

Důsledky tohoto stavu jsou dalekosáhlé. Řada úpraven vody díky tomu produkuje pitnou vodu hluboko pod mezí možností provozovaných technologií a zároveň ale také při nepoměrně vyšších provozních nákladech, než by umožňoval optimalizovaný provoz. Nesprávně provozovaná technologie koagulace/flokulace se projeví především nízkou kvalitou upravené vody, zhoršenou

účinností separace vzniklých agregátů, zkrácením filtračních cyklů a nárůstem spotřeby prací vody a elektrické energie.

Zavedení jednotné metodiky laboratorních koagulačních flokulačních testů do praxe řízení úpraven vody tedy nutně povede k následujícím skutečnostem:

1. zlepšení kvality produkované pitné vody,
2. snížení množství chemikálií, především pak množství koagulačního činidla,
3. prodloužení filtračních cyklů,
4. snížení produkce zvodnělých kalů a
5. úspora prací vody a energie.

5. Uplatnění metodiky

Metodika laboratorních koagulačních/flokulačních testů je určena všem provozovatelům úpraven vody, především pak technologům jednotlivých provozů. Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i. se dlouhodobě zabývá problematikou úpravy vody koagulací, optimalizací podmínek úpravy, kontrolou provozních podmínek úpraven vody a návrhy nových technologií pro jednotlivé provozy úpraven vody. Ze zkušeností získaných touto činností vyplynula nutnost vypracování jednotné metodiky laboratorních koagulačních/flokulačních testů, respektující nejnovější poznatky v oboru a umožňující jejich využití v provozu a řízení úpraven vody. Vzhledem k neustálému zhoršování kvality surové vody sloužící jako primární zdroj pro výrobu vody pitné, se v současnosti dostává řada úpraven při stávajícím způsobu provozování technologií na hranici upravitelnosti dané vody na pitnou. Bez optimalizace provozních technologií a zpětné vazby mezi laboratorním experimentem a vlastním provozem nebude v budoucnu pravděpodobně možné efektivně úpravu vody provádět. Ostatně tento stav již dnes na řadě úpraven vody nastal. Není také možné provozovat technologie úpravy vody hluboko pod jejich limity, pokud je zřejmé, že produkovaná voda by při optimalizované technologii mohla být výrazně kvalitnější a provozní náklady výrazně nižší.

Certifikovaná metodika bude vydána v knižní podobě zhotovitelem (Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i.) a poskytnuta všem provozovatelům úpraven vody v ČR. Vedle provozovatelů úpraven vody nalezne metodika uplatnění také u podniků zabývajících se projekční činností v oblasti technologie úpravy vody.

6. Ekonomické aspekty

Ekonomické důsledky zavedení laboratorních koagulačních/flokulačních testů pro optimalizaci úpravy vody mohou být značné. Přesné vyčíslení je možné pouze pro konkrétní úpravny vody v závislosti na kvalitě surové vody a provozované technologii koagulace a následné separace agregátů (jiné úspory budou pro jednostupňovou a dvoustupňovou technologii úpravy vody). Přínos laboratorních optimalizací je však možné demonstrovat na konkrétním případu úpravny upravující surovou vodu s obsahem organických látek produkovaných sinicemi. Úpravna produkuje

cca 120 l/s upravené vody. Původní neoptimalizovaná technologie byla provozována při dávce síranu hlinitého cca 60–80 $g \cdot m^{-3}$ v závislosti na ročním období a kvalitě surové vody. Zavedením laboratorních koagulačních/flokulačních testů vedoucím k optimalizaci technologie úpravy vody bylo možné snížení dávek koagulačního činidla na cca 40–50 $g \cdot m^{-3}$, což představuje úsporu cca 33–38 % použité chemikálie. Při spotřebě cca 540 tun síranu hlinitého ročně a ceně cca 4 tis. Kč bez DPH za tunu se uspořené náklady pohybují okolo 760 tis. Kč bez DPH za rok. K dalším úsporám došlo v důsledku prodloužení filtračních cyklů z původní doby na dvojnásobek. Jen úspora prací vody se tak pohybovala okolo 200 m^3 prací vody na den, tj. 73 tis. m^3 za rok. Při ceně prací vody cca 16 Kč bez DPH za m^3 to představuje celkové roční úspory ve výši 1 168 tis. Kč bez DPH. Další úspory pak je možné očekávat sníženou spotřebou elektrické energie vynaložené především na pohon médií (vzduch, voda) při praní filtrů. Všechny tyto úspory byly dosaženy při zlepšení kvality pitné vody.

Z uvedené kalkulace na konkrétním případu je zřejmé, že úspory vyplývající z optimalizace provozu technologie úpravy vody pomocí laboratorních koagulačních/flokulačních testů, a to přesto, že optimalizace je primárně určena pro zlepšení kvality pitné vody, mohou být značné. Vždy však vyplývají z konkrétních podmínek dané úpravny vody.

Náklady spojené se zavedením postupů uvedených v metodice spočívají především v jednorázovém pořízení laboratorní míchací kolony. Cena kolony se v závislosti na provedení pohybuje v relaci cca 40–150 tis. Kč bez DPH. Ostatní vybavení potřebné k provozování laboratorních koagulačních/flokulačních testů je obvykle běžnou součástí vybavení laboratoří na úpravnách vody. K nákladům je samozřejmě nutné započítat také náklady osobní. Časová náročnost provedení jedné laboratorní zkoušky popsané v této metodice se pohybuje okolo 3–4 hodin pro jednu osobu.

7. Seznam použité související literatury

Bache, D.H., Gregory, R.: *Flocs in Water Treatment*. IWA Publishing, London, **2007**.

Bratby, J.: *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*, 2nd Ed. IWA Publishing, London, Seattle, **2006**.

Bubáková, P., Pivokonský, M., Pivokonská, L. (**2011**): A method for evaluation of suspension quality easy applicable to practice: The effect of mixing on floc properties. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 59(3), 184–195.

Dolejš, P. (**2018**): Influence of coagulant/lime dosing sequence on treatment of soft humic waters. *Water Science and Technology: Water Supply* 13(1), 184-189.

Dolejš, P., Borovičková, M. (**2005**). Aggregation of humic substances in systems with different initial pH and optimum dose of coagulant. *Chemické listy* 99(14), 95-96.

Dolejš, P. (**1993**): Influence of algae and their exudates on removal of humic substances and optimal dose of coagulant. *Water Science and Technology* 27(11), 123-132.

Dolejš, P. (**1984**): Interaction of temperature, alkalinity and alum dose by coagulation of humic water. *Studies in Environmental Science* 23(C), 169-178.

Dolejš P. (**2010**). Možnosti zlepšení provozu úpraven vody optimalizací dávky koagulantu a pH. In: *Sborník XIV. mezinárodní konference Voda Zlín 2010*. Zlín: Moravská vodárenská a.s., s. 91-96.

Gregory, J.: *Particles in Water: Properties and Processes*. CRC Press, Boca Raton, London, New York, **2006**.

Hereit, F., Mutl, S., Vágner, V. (**1980**): Direct measurement of floc breakage in flowing suspension. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA* 29, 95-99.

Načeradská, J., Pivokonská, L., Pivokonský, M. (**2019**): On the importance of pH value in coagulation. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA* 68(3), 222-230.

Pitter, P.: *Hydrochemie*. 5. vydání, VŠCHT Praha, **2015**.

Pivokonský, M., Bubáková, P., Pivokonská, L., Knesl, B.: *Tvorba suspenze při úpravě vody. Teorie a praxe*. Líbeznice: Medim, **2011**.

Polášek, P., Mutl, S.: *Guidelines to Coagulation and Flocculation for Surface Waters: Volume 1 – Design Principles for Coagulation and Flocculation Systems.* Polasek & Associates, Marshalltown, South Africa, **1995**.

8. Seznam publikací předcházejících metodice

Načeradská, J., Pivokonská, L., Pivokonský, M. (**2019**): On the importance of pH value in coagulation. *Journal of Water Supply Research and Technology – AQUA* 68 (3), 222–230.

Pivokonský, M., Načeradská, J., Novotná, K., Čermáková, L., Vašatová, P.: Flocculation of AOM in Water Treatment. In: *Flocculation: Processes and Applications* (Vollan, E.) New York: Nova Science, **2019**, 107–142.

Načeradská, J., Novotná, K., Čermáková, L., Cajthaml, T., Pivokonský, M. (**2019**): Investigating the coagulation of non-proteinaceous algal organic matter: Optimizing coagulation performance and identification of removal mechanisms. *Journal of Environmental Sciences* 79, 25–34.

Barešová, M., Pivokonský, M., Novotná, K., Načeradská, J., Brányik, T. (**2017**): An application of cellular organic matter to coagulation of cyanobacterial cells (*Merismopedia tenuissima*). *Water Research* 122, 70–77.

Načeradská, J., Pivokonský, M., Pivokonská, L., Barešová, M., Henderson, R.K., Zamyadi, A., Janda, V. (**2017**): The impact of pre-oxidation with potassium permanganate on cyanobacterial organic matter removal by coagulation. *Water Research* 114, 42–49.

Novotná, K., Barešová, M., Čermáková, L., Načeradská, J., Pivokonský, M. (**2016**): Effect of cyanobacterial peptides and proteins on coagulation of kaolinite. *European Journal of Environmental Sciences* 6(2), 83–89.

Pivokonský, M., Načeradská, J., Kopecká, I., Barešová, M., Jefferson, B., Li, X., Henderson, R.K. (**2016**): The impact of algogenic organic matter on water treatment plant operation and water quality: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 46(4), 291–335.

Pivokonský, M., Načeradská, J., Brabenec, T., Novotná, K., Barešová, M., Janda, V. (**2015**): The impact of interactions between algal organic matter and humic substances on coagulation. *Water Research* 84, 278–285.

Šafaříková, J., Barešová, M., Pivokonský, M., Kopecká, I. (**2013**): Influence of peptides and proteins produced by cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* on the coagulation of turbid waters. *Separation and Purification Technology* 18, 49–57.

Bubáková, P., Pivokonský, M., Pivokonský, R., Filip, P. (**2013**): The effect of shear rate on aggregate size distribution and structure at steady state: a comparison between a Taylor–Couette reactor to a mixing tank. *Journal of Water Supply Research and Technology – AQUA* 62(5), 288–295.

Bubáková, P., Pivokonský, M., Filip, P. (**2013**): Effect of shear rate on aggregate size and structure in the process of aggregation and at steady state. *Powder Technology* 235, 540–549.

Pivokonský, M., Šafaříková, J., Bubáková, P., Pivokonská, L. (**2012**): Coagulation of peptides and proteins produced by *Microcystis aeruginosa*: Interaction mechanisms and the effect of Fe-peptide/protein complexes formation. *Water Research* 46(17), 5583–5590.

Bubáková, P., Pivokonský, M. (**2012**): The influence of velocity gradient on properties and filterability of suspension formed during water treatment. *Separation and Purification Technology* 92, 161–167.

Bubáková, P., Pivokonský, M., Pivokonská, L. (**2011**): A method for evaluation of suspension quality easy applicable to practice: The effect of mixing on floc properties. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 59(3), 184–195.

Pivokonský, M., Bubáková, P., Pivokonská, L., Knesl, B.: *Tvorba suspenze při úpravě vody. Teorie a praxe*. Líbeznice: Medim, **2011**.

Pivokonský, M., Bubáková, P., Pivokonská, L., Hnaťuková, P. (**2011**): The effect of global velocity gradient on the character and filterability of aggregates formed during the coagulation/flocculation process. *Environmental Technology* 32(12), 1355–1366.

Pivokonská, L., Pivokonský, M., Benešová, L., Bäumeltová, J. (**2009**): The removability of the NOM fractions using hydrolysing destabilisation reagents. *Acta Universitatis Carolinae. Environmentalica* 23(1-2), 7–16.

Pivokonský, M., Pivokonská, L., Bäumeltová, J., Bubáková, P. (**2009**): The effect of cellular organic matter produced by cyanobacteria *Microcystis aeruginosa* on water purification. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 57(2), 121–129.

Pivokonský, M., Polášek, P., Pivokonská, L., Tomášková, H. (**2009**): Optimized reaction conditions for removal of cellular organic matter of *Microcystis aeruginosa* during the destabilization and aggregation process using ferric sulfate in water purification. *Water Environment Research* 81(5), 514–522.

Tomášková, H., Pivokonská, L., Pivokonský, M. (**2008**): Frakcionace přírodních organických látek a hliníku při optimalizaci úpravy vody destabilizací a agregací nečistot. *Chemické listy* 102(12), 1131–1137.

Pivokonská, L., Pivokonský, M., Tomášková, H. (**2008**): Optimization of NOM removal during water treatment. *Separation Science and Technology* 43(7), 1687–1700.

Tomášková, H., Benešová, L., Pivokonský, M. (**2007**): Optimisation of the coagulation process of surface water with high content of natural aluminium. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 55(3), 199–208.

Pivokonský, M., Klouček, O., Pivokonská, L. (**2006**): Evaluation of the production, composition and aluminum and iron complexation of algogenic organic matter. *Water Research* 40(16), 3045–3052.

Mutl, S., Polášek, P., Pivokonský, M., Klouček, O. (**2006**): The influence of G and T on the course of aggregation in treatment of medium polluted surface water. *Water Science and Technology: Water Supply* 6(1), 39–48.

Pivokonská, L., Pivokonský, M. (**2006**): The influence of agitation on aggregates formed during treatment of water with a content of humic substances. *Water Science and Technology: Water Supply* 6(1), 211–218.

Pivokonský, M., Pivokonský, R., Benešová, L., Mutl, S. (**2003**): Methodology of evaluation of size and size-distribution of particles formed during aggregation. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 51(4), 281–287.

9. Dedikace

Metodika byla zpracována v rámci projektu č. TJ01000169 „Vývoj a využití nových technologií pro intenzifikaci tvorby a separace agregátů při úpravě vody – proces vysokoúčinné flokulace“ za podpory Technologické agentury ČR, programu ZETA.

10. Přílohy

10.1 Fyzikální vlastnosti vody

Tab. 10.1: Dynamická viskozita η, hustota ρ_v a kinematická viskozita v vody v závislosti na teplotě T při atmosférickém tlaku 101,325 kPa ($\eta = \rho_v \cdot v$)

T °C	η 10^{-3} Pa·s	ρ_v kg·m^{-3}	v m^2·s^{-1}
0,0	1,792	999,82	1,7923
1,0	1,731	999,89	1,7312
2,0	1,674	999,94	1,6741
3,0	1,620	999,98	1,6200
4,0	1,569	1000,00	1,5690
5,0	1,520	1000,00	1,5200
6,0	1,473	999,99	1,4730
7,0	1,429	999,96	1,4291
8,0	1,386	999,91	1,3861
9,0	1,346	999,85	1,3462
10,0	1,308	999,77	1,3083
11,0	1,271	999,68	1,2714
12,0	1,236	999,58	1,2365
13,0	1,202	999,46	1,2026
14,0	1,170	999,33	1,1708
15,0	1,139	999,19	1,1399
16,0	1,109	999,03	1,1101
17,0	1,081	998,86	1,0822
18,0	1,054	998,68	1,0554
19,0	1,028	998,49	1,0296
20,0	1,003	998,29	1,0047
21,0	0,979	998,08	0,9809
22,0	0,955	997,86	0,9570
23,0	0,933	997,62	0,9352
24,0	0,911	997,38	0,9134
25,0	0,891	997,13	0,8936

10.2 Molekulové (atomové) hmotnosti

Tab. 10.2: Relativní molekulová – M_r (atomová – A_r) hmotnost v technologii vody nejčastěji používaných sloučenin a prvků

sloučenina / prvek	relativní molekulová (atomová) hmotnost
Al	26,9815
$AlCl_3$	133,3405
$AlCl_3.6H_2O$	241,4317
$Al_2(SO_4)_3$	342,1538
$Al_2(SO_4)_3.18H_2O$	666,4274
$Al(OH)_3$	78,0034
Al_2O_3	101,9612
Fe	55,8470
$FeCl_3$	162,2060
$FeCl_3 .6H_2O$	270,2972
$FeSO_4$	151,9106
$Fe_2(SO_4)_3$	399,8848
$Fe_2(SO_4)_3.9H_2O$	562,0216
$FeClSO_4$	187,3636
$FeClSO_4.6H_2O$	295,4548
$Fe(OH)_3$	106,8689
Fe_2O_3	159,6922
Ca	40,0780
CaO	56,0774
$Ca(OH)_2$	74,0926
H_2SO_4	98,0794

10.3 Přepočty hmotnostních a látkových koncentrací některých koagulačních činidel

Tab. 10.3: Přepočet hmotnostní koncentrace ρ $Al_2(SO_4)_3$ na obsah Al a látkovou koncentraci *c*

ρ ($Al_2(SO_4)_3$) mg·l^{-1}	ρ (Al) mg·l^{-1}	*c* ($Al_2(SO_4)_3$) mmol·l^{-1}
1	0,1577	0,0029
5	0,7886	0,0146
10	1,5772	0,0292
15	2,3658	0,0438
20	3,1543	0,0585
25	3,9429	0,0731
30	4,7315	0,0877
35	5,5201	0,1023
40	6,3087	0,1169
45	7,0973	0,1315
50	7,8859	0,1461
55	8,6744	0,1607
60	9,4630	0,1754
65	10,2516	0,1900
70	11,0402	0,2046
75	11,8288	0,2192
80	12,6174	0,2338
85	13,4060	0,2484
90	14,1945	0,2630
95	14,9831	0,2777
100	15,7717	0,2923
105	16,5603	0,3069
110	17,3489	0,3215
115	18,1375	0,3361
120	18,9261	0,3507
125	19,7146	0,3653
130	20,5032	0,3799
135	21,2918	0,3946
140	22,0804	0,4092
145	22,8690	0,4238
150	23,6576	0,4384

Výpočet proveden podle vztahů:

$$c(Al_2(SO_4)_3) = \frac{\rho(Al_2(SO_4)_3)}{M(Al_2(SO_4)_3)}$$

$$\rho(Al) = 2 \cdot \rho(Al_2(SO_4)_3) \cdot \frac{M(Al)}{M(Al_2(SO_4)_3)}$$

Tab. 10.4: Přepočet hmotnostní koncentrace ρ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18\ H_2O$ na obsah Al a látkovou koncentraci *c*

ρ ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18\ H_2O$) mg·l^{-1}	ρ (Al) mg·l^{-1}	*c* ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18\ H_2O$) mmol·l^{-1}
1	0,0810	0,0015
5	0,4049	0,0075
10	0,8097	0,0150
15	1,2146	0,0225
20	1,6195	0,0300
25	2,0243	0,0375
30	2,4292	0,0450
35	2,8341	0,0525
40	3,2390	0,0600
45	3,6438	0,0675
50	4,0487	0,0750
55	4,4536	0,0825
60	4,8584	0,0900
65	5,2633	0,0975
70	5,6682	0,1050
75	6,0730	0,1125
80	6,4779	0,1200
85	6,8828	0,1275
90	7,2876	0,1350
95	7,6925	0,1426
100	8,0974	0,1501
105	8,5023	0,1576
110	8,9071	0,1651
115	9,3120	0,1726
120	9,7169	0,1801
125	10,1217	0,1876
130	10,5266	0,1951
135	10,9315	0,2026
140	11,3363	0,2101
145	11,7412	0,2176
150	12,1461	0,2251

Výpočet proveden podle vztahů:

$$c(Al_2(SO_4)_3.18H_2O) = \frac{\rho(Al_2(SO_4)_3.18H_2O)}{M(Al_2(SO_4)_3.18H_2O)}$$

$$\rho(Al) = 2 \cdot \rho(Al_2(SO_4)_3.18H_2O) \cdot \frac{M(Al)}{M(Al_2(SO_4)_3.18H_2O)}$$

Tab. 10.5: Přepočet hmotnostní koncentrace ρ $FeCl_3$ na obsah Fe a látkovou koncentraci *c*

ρ ($FeCl_3$) mg·l^{-1}	ρ (Fe) mg·l^{-1}	*c* ($FeCl_3$) mmol·l^{-1}
1	0,344	0,0062
5	1,721	0,0308
10	3,443	0,0617
15	5,164	0,0925
20	6,886	0,1233
25	8,607	0,1541
30	10,329	0,1850
35	12,050	0,2158
40	13,772	0,2466
45	15,493	0,2774
50	17,214	0,3083
55	18,936	0,3391
60	20,657	0,3699
65	22,379	0,4007
70	24,100	0,4316
75	25,822	0,4624
80	27,543	0,4932
85	29,265	0,5240
90	30,986	0,5549
95	32,707	0,5857
100	34,429	0,6165
105	36,150	0,6473
110	37,872	0,6782
115	39,593	0,7090
120	41,315	0,7398
125	43,036	0,7706
130	44,758	0,8015
135	46,479	0,8323
140	48,200	0,8631
145	49,922	0,8939
150	51,643	0,9248

Výpočet proveden podle vztahů:

$$c(FeCl_3) = \frac{\rho(FeCl_3)}{M(FeCl_3)}$$

$$\rho(Fe) = \rho(FeCl_3) \cdot \frac{M(Fe)}{M(FeCl_3)}$$

Tab. 10.6: Přepočet hmotnostní koncentrace ρ $FeCl_3.6\ H_2O$ na látkovou koncentraci *c* a na obsah Fe

ρ ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) mg·l^{-1}	ρ (Fe) mg·l^{-1}	*c* ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) mmol·l^{-1}
1	0,207	0,0037
5	1,033	0,0185
10	2,066	0,0370
15	3,099	0,0555
20	4,132	0,0740
25	5,165	0,0925
30	6,198	0,1110
35	7,231	0,1295
40	8,264	0,1480
45	9,297	0,1665
50	10,330	0,1850
55	11,363	0,2035
60	12,396	0,2220
65	13,429	0,2405
70	14,462	0,2590
75	15,496	0,2775
80	16,529	0,2960
85	17,562	0,3145
90	18,595	0,3330
95	19,628	0,3515
100	20,661	0,3700
105	21,694	0,3885
110	22,727	0,4070
115	23,760	0,4255
120	24,793	0,4440
125	25,826	0,4625
130	26,859	0,4810
135	27,892	0,4995
140	28,925	0,5180
145	29,958	0,5364
150	30,991	0,5549

Výpočet proveden podle vztahů:

$$c(FeCl_3.6H_2O) = \frac{\rho(FeCl_3.6H_2O)}{M(FeCl_3.6H_2O)}$$

$$\rho(Fe) = \rho(FeCl_3.6H_2O) \cdot \frac{M(Fe)}{M(FeCl_3.6H_2O)}$$

Tab. 10.7: Přepočet hmotnostní koncentrace ρ $Fe_2(SO_4)_3$ na obsah Fe a látkovou koncentraci *c*

ρ ($Fe_2(SO_4)_3$) mg·l^{-1}	ρ (Fe) mg·l^{-1}	*c* ($Fe_2(SO_4)_3$) mmol·l^{-1}
1	0,279	0,0025
5	1,397	0,0125
10	2,793	0,0250
15	4,190	0,0375
20	5,586	0,0500
25	6,983	0,0625
30	8,379	0,0750
35	9,776	0,0875
40	11,172	0,1000
45	12,569	0,1125
50	13,966	0,1250
55	15,362	0,1375
60	16,759	0,1500
65	18,155	0,1625
70	19,552	0,1751
75	20,948	0,1876
80	22,345	0,2001
85	23,741	0,2126
90	25,138	0,2251
95	26,534	0,2376
100	27,931	0,2501
105	29,328	0,2626
110	30,724	0,2751
115	32,121	0,2876
120	33,517	0,3001
125	34,914	0,3126
130	36,310	0,3251
135	37,707	0,3376
140	39,103	0,3501
145	40,500	0,3626
150	41,897	0,3751

Výpočet proveden podle vztahů:

$$c(Fe_2(SO_4)_3) = \frac{\rho(Fe_2(SO_4)_3)}{M(Fe_2(SO_4)_3)}$$

$$\rho(Fe) = 2 \cdot \rho(Fe_2(SO_4)_3) \cdot \frac{M(Fe)}{M(Fe_2(SO_4)_3)}$$

Tab. 10.8: Přepočet hmotnostní koncentrace ρ $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9\ H_2O$ na obsah Fe a látkovou koncentraci *c*

ρ ($Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$) mg·l^{-1}	ρ (Fe) mg·l^{-1}	*c* ($Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$) mmol·l^{-1}
1	0,199	0,0018
5	0,994	0,0089
10	1,987	0,0178
15	2,981	0,0267
20	3,975	0,0356
25	4,968	0,0445
30	5,962	0,0534
35	6,956	0,0623
40	7,949	0,0712
45	8,943	0,0801
50	9,937	0,0890
55	10,930	0,0979
60	11,924	0,1068
65	12,918	0,1157
70	13,911	0,1246
75	14,905	0,1334
80	15,898	0,1423
85	16,892	0,1512
90	17,886	0,1601
95	18,879	0,1690
100	19,873	0,1779
105	20,867	0,1868
110	21,860	0,1957
115	22,854	0,2046
120	23,848	0,2135
125	24,841	0,2224
130	25,835	0,2313
135	26,829	0,2402
140	27,822	0,2491
145	28,816	0,2580
150	29,810	0,2669

Výpočet proveden podle vztahů:

$$c(Fe_2(SO_4)_3.9H_2O) = \frac{\rho(Fe_2(SO_4)_3.9H_2O)}{M(Fe_2(SO_4)_3.9H_2O)}$$

$$\rho(Fe) = 2 \cdot \rho(Fe_2(SO_4)_3.9H_2O) \cdot \frac{M(Fe)}{M(Fe_2(SO_4)_3.9H_2O)}$$

10.4 Vzorové tabulky pro záznam dat sklenicové optimalizační zkoušky

Tab. 10.9: Stanovení dávek činidel pro úpravu reakčního pH při sklenicové zkoušce

datum:	**laborant:**
typ vzorku/surová voda:	**typ činidla a jeho dávka [mg·l^{-1}]:**
poznámky:	

pH	**Přídavek okyselujícího činidla [ml]**	**pH**	**Přídavek alkalizačního činidla [ml]**
	0		0

Pozn. 1: U vod s nízkou $KNK_{4,5}$ lze nejprve přidávat sodu ke zvýšení jejích hodnot.
Pozn. 2: Zjištěná množství činidel pro úpravu pH budou pak dávkována do surové vody před koagulačními testy k dosažení požadovaných výsledných hodnot pH.

Tab. 10.10: Návrh tabulky pro záznam dat sklenicové optimalizační zkoušky

datum:	**laborant:**
typ vzorku/surová voda:	**typ činidla a jeho dávka [mg·l^{-1}]:**
homogenizační míchání (intenzita a doba):	**agregační míchání rychlé/pomalé (intenzita a doba):**
poznámky:	

sklenice	**přídavek činidla pro úpravu pH [ml/sklenice]**	**pH[-]**	**$KNK_{4,5}$ spotřeba [ml]**	**$CHSK_{Mn}$ spotřeba [ml]**	**DOC [mg·l^{-1}]**	**zákal A [-]**	**Zbytkové činidlo Fe/Al [mg·l^{-1}]**
surová v.	-						
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							

Pozn. 1: Při titračním stanovení $KNK_{4,5}$ a $CHSK_{Mn}$ se jedná o spotřebu titračních činidel. A je absorbance, pokud je koncentrace zákalu (popř. Fe/Al) měřena spektrofotometricky.

Pozn. 2: Sledované parametry mohou být zvoleny s ohledem na charakter surové vody a použitá činidla.

10.5 Vzorové zpracování dat sklenicové optimalizační zkoušky

název: optimalizace hodnoty pH pro dávku 50 mg·l^{-1} $Fe_2(SO_4)_3$

datum: 3. 9. 2019

laborant: RP + PV

typ vzorku/surová voda: přírodní voda – nádrž Vrchlice (Kutná Hora)

typ činidla a jeho dávka [mg·l^{-1}]: $Fe_2(SO_4)_3$; D = 50 mg·l^{-1} (pipetováno 10 ml 1% roztoku $Fe_2(SO_4)_3$ do 2 litrů)

homogenizační míchání (intenzita a doba): 100 rpm, tj. G = 186 s^{-1}; 1 min

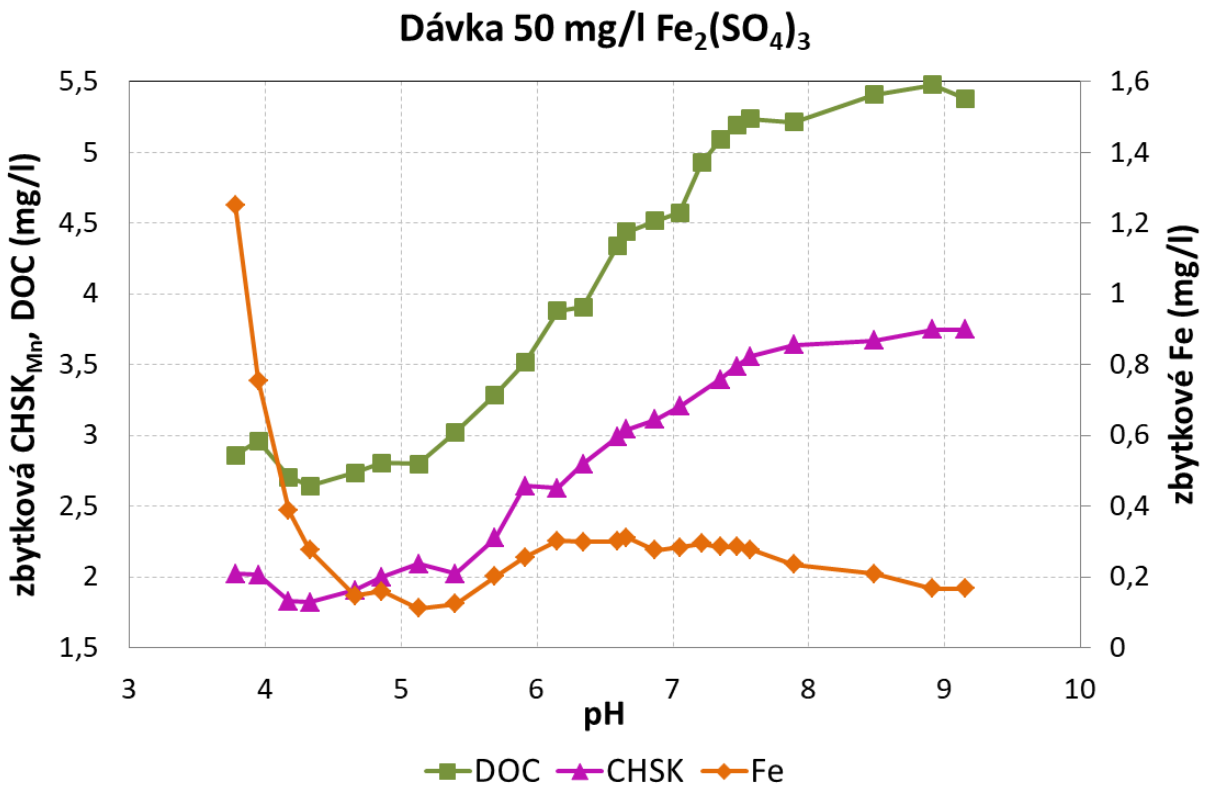
agregační míchání rychlé/pomalé (intenzita a doba): 40 rpm, tj. G = 47 s^{-1}; 30 min

poznámky:
- koncentrace 1% roztoku $Fe_2(SO_4)_3$ (ověřená na ICP) = 2670,3346 mg·l^{-1} Fe => skutečná dávka = 13,35 mg·l^{-1} Fe
- surová voda: teplota t = 13°C; $KNK_{4,5}$ = 1,82 mmol·l^{-1}

sklenice	přídavek činidla pro úpravu pH [ml/sklenice]		pH [-]	$CHSK_{Mn}$ spotřeba [ml]	$CHSK_{Mn}$ [mg·l^{-1}]	DOC [mg·l^{-1}]	účinnost odstranění DOC [%]	zbytkové činidlo Fe [mg·l^{-1}]
surová v.	-	-	7,32	6,3	4,94	6,4343	-	-
1	okyselení 0,5 M H_2SO_4	3	**3,78**	2,58	2,02	2,8598	55,6	1,2507
2		2,85	**3,95**	2,57	2,01	2,9617	54,0	0,7551
3		2,7	**4,17**	2,33	1,83	2,7042	58,0	0,3878
4		2,6	**4,33**	2,32	1,82	2,6412	59,0	0,2761
5		2,5	**4,66**	2,43	1,91	2,7338	57,5	0,146
6		2,4	**4,86**	2,55	2,00	2,805	56,4	0,1584
7		2,3	**5,13**	2,67	2,09	2,7966	56,5	0,1114
8		2,1	**5,40**	2,58	2,02	3,0224	53,0	0,1233
9		1,8	**5,69**	2,9	2,27	3,287	48,9	0,201
10		1,5	**5,91**	3,37	2,64	3,5163	45,4	0,2559
11		1	**6,15**	3,35	2,63	3,8779	39,7	0,3019
12		0,5	**6,34**	3,57	2,80	3,9049	39,3	0,2987
13		0	**6,59**	3,81	2,99	4,3372	32,6	0,3008
14	alkalizace $Ca(OH)_2$	5	**6,66**	3,88	3,04	4,4392	31,0	0,3111
15		15	**6,87**	3,97	3,11	4,5153	29,8	0,2752
16		21	**7,05**	4,09	3,21	4,5726	28,9	0,2835
17		27	**7,21**	4,21	3,30	4,9276	23,4	0,294
18		30	**7,35**	4,33	3,39	5,0883	20,9	0,2852
19		33	**7,47**	4,45	3,49	5,196	19,2	0,2854
20		35	**7,57**	4,54	3,56	5,2369	18,6	0,2769
21		40	**7,89**	4,64	3,64	5,2144	19,0	0,2355
22		45	**8,48**	4,68	3,67	5,4083	15,9	0,2084
23		50	**8,91**	4,78	3,75	5,479	14,8	0,1665
24		55	**9,15**	4,78	3,75	5,3798	16,4	0,1662

Poznámka: Hodnoty zákalu a $KNK_{4,5}$ nebyly v tomto případě stanovovány.

Z výše uvedené tabulky a z obr. 6 vyplývá, že optimální pH pro odstranění železa (kdy je koncentrace Fe pod svou limitní hodnotou 0,2 mg·l^{-1}) se pohybuje v rozmezí 4,7–5,4. Optimum pH pro odstranění organických látek (stanovených jako DOC a $CHSK_{Mn}$) je však ještě nižší, kolem hodnoty 4,3.



Obr. 6: Grafické znázornění výsledků sklenicové zkoušky optimalizace pH pro dávku 50 mg·l^{-1} $Fe_2(SO_4)_3$

Pro potvrzení optimální hodnoty pH a určení optimální dávky koagulačního činidla (v tomto případě síranu železitého) je nutné stejným způsobem provést další série sklenicových zkoušek pro různé dávky koagulačního činidla (např. 30, 40, 60 a 70 mg·l^{-1} $Fe_2(SO_4)_3$) a výsledky vzájemně porovnat, ať už pomocí grafu (obr. 4ab a 5ab) nebo matice (obr. 4cd a 5cd).

10.6 Ředění H_2SO_4 a HNO_3

Tab. 10.11: Objemy kyseliny sírové a kyseliny dusičné pipetované pro získání 1 litru roztoku o dané látkové koncentraci. V případě použití kyselin s jinou koncentrací je nutné uvedené objemy přepočítat podle návodu níže.

H_2SO_4 ($c_{roztoku}$)	**objem do 1 litru*** $V_{H_2SO_4}$ [ml]		
$w_{H_2SO_4}$·100 %	**96 %**	**97 %**	**98 %**
0,01 M	0,56	0,55	0,55
0,1 M	5,57	5,51	5,45
0,5 M	27,83	27,54	27,25
1 M	55,66	55,09	54,51

*$V_{roztoku}$ = 1000 ml

HNO_3 ($c_{roztoku}$)	**objem do 1 litru*** $V_{roztoku}$ [ml]		
w_{HNO_3}·100 %	**64 %**	**65 %**	**66 %**
0,01 M	0,71	0,70	0,68
0,1 M	7,10	6,97	6,84
1 M	71,00	69,68	68,39
3,4 M	241,41	236,90	232,54

*$V_{roztoku}$ = 1000 ml

Výpočet:

$c_{roztoku}$ = požadovaná koncentrace [mol·l^{-1}]
$V_{roztoku}$ = požadovaný objem [ml]
$M_{H_2SO_4}$ = 98,08 g·mol^{-1}
M_{HNO_3} = 63,01 g·mol^{-1}

$$V_{H_2SO_4} = \frac{c_{roztoku} \cdot V_{roztoku} \cdot M_{H_2SO_4}}{w_{H_2SO_4} \cdot \rho_{H_2SO_4}} \text{ [ml]}$$

$$V_{HNO_3} = \frac{c_{roztoku} \cdot V_{roztoku} \cdot M_{HNO_3}}{w_{HNO_3} \cdot \rho_{HNO_3}} \text{ [ml]}$$

H_2SO_4	
$w_{H_2SO_4}$ = hmotnostní zlomek	$\rho_{H_2SO_4}$ = hustota
0,96 (96%)	1835,5 g·l^{-1}
0,97 (97%)	1835,8 g·l^{-1}
0,98 (98%)	1836,1 g·l^{-1}

HNO_3	
w_{HNO_3} = hmotnostní zlomek	ρ_{HNO_3}= hustota
0,64 (64%)	1386,6 g·l^{-1}
0,65 (65%)	1391,25 g·l^{-1}
0,66 (66%)	1395,9 g·l^{-1}

10.7 Ředění HCl, NaOH a $NaHCO_3$

Tab. 10.12: Objemy kyseliny chlorovodíkové a hmotnosti hydroxidu a hydrogenuhličitanu sodného pipetované, resp. odvažované, pro získání 1 litru roztoku o dané látkové koncentraci. V případě použití kyseliny chlorovodíkové s jinou koncentrací je nutné uvedené objemy přepočítat podle návodu níže.

HCl ($c_{roztoku}$)	**objem do 1 litru*** V_{HCl} [ml]
w_{HCl}·100 %	**35 %**
0,1 M	8,83
1 M	88,28
2 M	176,56
3 M	264,84

*$V_{roztoku}$ = 1000 ml

NaOH ($c_{roztoku}$)	**hmotnost do 1 litru*** m_{NaOH} [g]
0,1 M	4
0,5 M	20
1 M	40
2 M	80
3 M	120

*$V_{roztoku}$ = 1 litr

$NaHCO_3$ ($c_{roztoku}$)	**hmotnost do 1 litru*** m_{NaHCO_3} [g]
0,1 M	8,4
0,125 M	10,5
0,25	21
0,5 M	42
0,75 M	63

*$V_{roztoku}$ = 1 litr

Výpočet:

$c_{roztoku}$ = požadovaná koncentrace [mol·l^{-1}]
$V_{roztoku}$ = požadovaný objem [ml]
M_{HCl} = 36,46 g·mol^{-1}
M_{NaOH} = 40 g·mol^{-1}
M_{NaHCO_3} = 84 g·mol^{-1}
ρ_{HCl} = 1180 g·l^{-1} (w_{HCl} = 0,35)

$$V_{HCl} = \frac{c_{roztoku} \cdot V_{roztoku} \cdot M_{HCl}}{w_{HCl} \cdot \rho_{HCl}} \text{ [ml]}$$

$$m_{NaOH} = c_{roztoku} \cdot V_{roztoku} \cdot M_{NaOH} \text{ [g]}$$

$$m_{NaHCO_3} = c_{roztoku} \cdot V_{roztoku} \cdot M_{NaHCO_3}$$

10.8 Příprava 1% roztoku $Fe_2(SO_4)_3$

Zásobní roztok $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$
(údaje na lahvi)
w = 59,8 hm. %
ρ = **1,538 g·cm^3 = ρ_1**

Přepočet na bezvodý $Fe_2(SO_4)_3$
$M(Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O)$ = 562,0168 g·mol^{-1}
$M(Fe_2(SO_4)_3)$ = 399,8788 g·mol^{-1}
w = 399,8788 · 59,8 / 562,0168 = **42,55 hm. % = w_1**

Ředění na 1 litr roztoku o koncentraci 1 hm. % – postup výpočtu

V_1 = ???
w_2 = 0 (voda)
ρ_2 = 1 g·cm^{-3} (voda)
$V_1 + V_2$ = 1 litr = 1000 ml
w_3 = 1 hm. %

Indexy:
1 = koncentrovaný (42,55%) roztok
2 = voda
3 = zředěný (1%) roztok

$$m_1w_1 + m_2w_2 = (m_1 + m_2)w_3$$

$$V_1\rho_1w_1 + V_2\rho_2w_2 = (V_1\rho_1 + V_2\rho_2)w_3$$

$$V_1 \cdot 1{,}538 \cdot 42{,}55 + (1000 - V_1) \cdot 1 \cdot 0 = (V_1 \cdot 1{,}538 + (1000 - V_1) \cdot 1) \cdot 1$$

$$V_1 \cdot 1{,}538 \cdot 42{,}55 = V_1 \cdot 1{,}538 + 1000 - V_1$$

$$V_1 = 15{,}4074 \text{ ml}$$

Pro přípravu 1% roztoku $Fe_2(SO_4)_3$ je potřeba doplnit 15,4 ml koncentrovaného roztoku (před odebráním NEMÍCHAT) destilovanou vodou do 1 litru.

Objem 1% roztoku dávkovaného do 2 litrových sklenic:

Hmotnostní zlomek roztoku: w = 0,01 = 1 g $Fe_2(SO_4)_3$ / 100 g roztoku

Pokud se hustota 1% roztoku činidla aproximuje hustotou vody (ρ = 1 g·cm^{-3}), pak hmotnostní koncentrace činidla 1 g $Fe_2(SO_4)_3$ / 100 ml roztoku = 10 000 mg $Fe_2(SO_4)_3$ / litr roztoku. Pro dosažení koncentrace 10 mg·l^{-1} $Fe_2(SO_4)_3$, je nutné tento roztok 1000 x naředit.

Pro dávku 10 mg·l^{-1} bezvodého $Fe_2(SO_4)_3$ je nutné pipetovat 1 ml 1% roztoku $Fe_2(SO_4)_3$ do 1 litru surové vody, resp. 2 ml 1% roztoku $Fe_2(SO_4)_3$ do 2 litrů (objem „sklenice“) surové vody.

Pozn. Přírůstek objemu v důsledku dávkování činidla do sklenic se zanedbává.

Vzhledem k faktu, že reálná hustota 1% roztoku $Fe_2(SO_4)_3$ se liší od hustoty vody, je takto zjištěná dávka pouze orientační. **Dávku je vhodné zpřesnit změřením koncentrace železa v připraveném 1% roztoku $Fe_2(SO_4)_3$ a jejím přepočtem na koncentraci $Fe_2(SO_4)_3$ (např. podle vztahu v příloze 10.3).**

10.9 Příprava 1% roztoku $Al_2(SO_4)_3$

Zásobní roztok $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$
(údaje na lahvi)
w = 49,8 hm. %
ρ = **1,308 g·cm^{-3} = ρ_1**

Přepočet na bezvodý $Al_2(SO_4)_3$
$M(Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O)$ = 666,4274 g·mol^{-1}
$M(Al_2(SO_4)_3)$ = 342,1538 g·mol^{-1}
w = 342,1538 · 49,8 / 666,4274 = **25,57 hm. % = w_1**

Ředění na 1 litr roztoku o koncentraci 1 hm. % – postup výpočtu

V_1 = ???
w_2 = 0 (voda)
ρ_2 = 1 g·cm^{-3} (voda)
$V_1 + V_2$ = 1 litr = 1000 ml
w_3 = 1 hm. %

Indexy:
1 = koncentrovaný (25,57%) roztok
2 = voda
3 = zředěný (1%) roztok

$$m_1w_1 + m_2w_2 = (m_1 + m_2)w_3$$

$$V_1\rho_1w_1 + V_2\rho_2w_2 = (V_1\rho_1 + V_2\rho_2)w_3$$

$$V_1 \cdot 1{,}308 \cdot 25{,}57 + (1000 - V_1) \cdot 1 \cdot 0 = (V_1 \cdot 1{,}308 + (1000 - V_1) \cdot 1) \cdot 1$$

$$V_1 \cdot 1{,}308 \cdot 25{,}57 = V_1 \cdot 1{,}308 + 1000 - V_1$$

$$V_1 = 30{,}177 \text{ ml}$$

Pro přípravu 1% roztoku $Al_2(SO_4)_3$ je potřeba doplnit 30,177 ml koncentrovaného roztoku (před odebráním NEMÍCHAT) destilovanou vodou do 1 litru.

Objem 1% roztoku dávkovaného do 2 litrových sklenic:

Hmotnostní zlomek roztoku: w = 0,01 = 1 g $Al_2(SO_4)_3$ / 100 g roztoku

Pokud se hustota 1% roztoku činidla aproximuje hustotou vody (ρ = 1 g·cm^{-3}), pak hmotnostní koncentrace činidla 1 g $Al_2(SO_4)_3$ / 100 ml roztoku = 10 000 mg $Al_2(SO_4)_3$ / litr roztoku. Pro dosažení koncentrace 10 mg·l^{-1} $Al_2(SO_4)_3$, je nutné tento roztok 1000 x naředit.

Pro dávku 10 mg·l^{-1} bezvodého $Al_2(SO_4)_3$ je nutné pipetovat 1 ml 1% roztoku $Al_2(SO_4)_3$ do 1 litru surové vody, resp. 2 ml 1% roztoku $Al_2(SO_4)_3$ do 2 litrů (objem „sklenice“) surové vody.

Pozn. Přírůstek objemu v důsledku dávkování činidla do sklenic se zanedbává.

Vzhledem k faktu, že reálná hustota 1% roztoku $Al_2(SO_4)_3$ se liší od hustoty vody, je takto zjištěná dávka pouze orientační. **Dávku je vhodné zpřesnit změřením koncentrace hliníku v připraveném 1% roztoku $Al_2(SO_4)_3$ a jejím přepočtem na koncentraci $Al_2(SO_4)_3$ (např. podle vztahu v příloze 10.3).**