



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV CHEMIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF CHEMISTRY

VYUŽITÍ FILTRU Z NANOVLÁKEN PRO FILTRACI VZDUCHU

USING OF NANOFIBER FILTER FOR AIR FILTRATION

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Petr Straka

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JITKA MALÁ, Ph.D.

BRNO 2018

Předložená práce byla vypracována za podpory Technologické agentury České republiky v rámci projektu č. TA01010356 „Vhodné materiály pro nanotechnologické aplikace při čištění a úpravě vody a vzduchu“.

Abstrakt

Dizertační práce s názvem „Využití filtru z nanovláken pro filtraci vzduchu“ představuje možnosti využití nanovlákných filtrů pro filtraci vzduchu zejména v náročných podmínkách vodárenských zařízení, a to z důvodu snížení rizika sekundární kontaminace vnitřního prostředí akumulčních prostorů a pitné vody.

Nanovlákné filtry se vyznačují vysokou účinností při filtraci polutantů, prachových částic a organických nečistot. Kontaminanty nemusí být zdraví škodlivé, ale mohou sloužit jako transportní podklad pro výtrusy, spory, mikroorganismy, mnohdy i jako substrát pro jejich množení a mohou tak negativně ovlivňovat kvalitu pitné vody.

Součástí výzkumu bylo sestavení vhodné metodiky zkoušení, konstrukce experimentální jednotky pro krátkodobé experimentální zkoušení filtrů nanovlákných i běžně používaných, a následné dlouhodobé experimentální ověření vlastností nanovlákného filtru v rámci vodohospodářského provozu. U filtrů byly posuzovány jak jejich charakteristické vlastnosti, tak filtrační účinnost vůči charakteristickým polutantům.

Krátkodobým i dlouhodobým experimentálním zkoušením byla prokázána vhodnost využití nanovlákných filtrů pro vodárenská zařízení. Oproti filtrům běžně používaným byla zaznamenána srovnatelná nebo vyšší účinnost zachytu sledovaných ukazatelů znečištění. Naměřená vyšší tlaková ztráta nanovlákných filtrů se při dlouhodobém experimentu ukázala být dostačující bez vlivu na provoz vodárenského zařízení. V průběhu zkoušení nebyly u nanovlákných filtrů pozorovány žádné provozní potíže, nedošlo k poškození filtrů ani k jejich deformaci.

Klíčová slova

Filtrace vzduchu, nanovlákné filtry, sekundární kontaminace, pitná voda, vodárenská zařízení.

Abstract

The doctoral thesis „Using of nanofiber filter for air filtration“ is focused on application of nanofiber filter for air filtration under demanding conditions of water supply facilities.

The main aim of the filter application is to decrease the secondary contamination of the indoor environment of the water accumulation tanks.

The nanofiber filters are distinguished by high filtration efficiency of pollutants, dust particles and organic impurities. The contaminants don't have to be unhealthy but they can be used for spore and microorganisms delivery to the system. They are served frequently as a reproduction substrate of microorganisms. All these factors negatively affect the water quality.

The research includes formation of suitable testing methodology, pilot unit construction and operation, short-term testing and evaluation of nanofiber filters and commonly used filters and long-term testing and verification of nanofiber filter attributes and quality. Furthermore the filter's characteristics and filtration efficiency for characteristic pollutants were evaluated.

Short-term and long-term experimental testing proved suitability of nanofiber filters use in water supply facilities. Interception of reported pollution indicators was reported on similar or higher level for application of nanofiber filter than for application of commonly used filter. Measured values of higher pressure difference of nanofiber filter were indicated as still adequate for use in water supply facilities. No operation difficulties, failures neither filter's damage were reported during testing of nanofiber filters.

Key words

Air filtration, nanofiber filter, secondary contamination, drinking water, water supply.

Bibliografická citace VŠKP

Ing. Petr Straka *Využití filtru z nanovláken pro filtraci vzduchu*. Brno, 2018. 119 s., 10 s. příl. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce doc. Ing. Jitka Malá, Ph.D., školitel – specialista doc. Ing. Jiří Hirš CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28.4.2018

.....

podpis autora

Ing. Petr Straka

Poděkování

Úvodem předložené práce bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli potřebné informace k dané problematice. Děkuji své školitelce doc. Ing. Jitce Malé, Ph.D., za cenné rady, připomínky, odborné vedení i trpělivost.

Zvláštní poděkování patří školiteli-specialistovi doc. Ing. Jiřímu Hiršovi CSc., za odborné vedení, povzbuzení, přístup i projevenou nadstandardní ochotu.

Dále bych rád poděkoval Ing. Jaroslavu Lvovi Ph.D. a firmě ASIO spol. s r.o. za umožnění práce na projektu NANAPL a za poskytnutí zázemí, prostředků a informací pro získání potřebných dat.

V neposlední řadě děkuji svým nejbližším za jejich stálou podporu, zejména synu Matějovi, který mne svým křikem neúnavně povzbuzoval ke zdárnému dokončení práce.

Obsah:

1. ÚVOD	11
2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	13
2.1 Filtrace vzduchu	13
2.1.1 Třídění filtrů	13
2.1.2 Použití filtrů	15
2.1.3 Teorie filtrace částic	18
2.1.4 Provedení filtrů vzduchu	21
2.1.5 Sorpční filtry	23
2.1.6 Dielektrické filtry a elektrofiltry	24
2.2 Charakteristika a vlastnosti nanotextilií	24
2.2.1 Názvosloví	24
2.2.2 Výrobní technologie	26
2.2.3 Elektrostatické zvlákňování	29
2.2.4 Morfologická charakteristika	31
2.2.5 Základy elektrohydrodynamiky	32
2.2.6 Obecné vlastnosti nanovláknenných materiálů	34
2.2.7 Rizika použití nanovláknenných materiálů	34
2.3 Vzdušná kontaminace obytných prostor	35
2.4 Vzdušná kontaminace vodárenských zařízení	36
2.4.1 Úvod do problematiky	36
2.4.2 Biologická problematika provozu vodárenských zařízení	38
2.4.3 Požadavky na návrh filtrů a způsob odvětrání	40
2.4.4 Kapacita filtračních náplní	42
2.4.5 Vlastnosti nanomateriálů užívaných pro vzdušné filtry	42
3. PŘEDMĚT A CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	44
3.1 Předmět dizertační práce	44
3.2 Cíle dizertační práce	44
4. HYPOTÉZY A METODY ŘEŠENÍ	46
4.1 Hypotézy	46
4.2 Metody řešení	47
5. KRÁTKODOBÝ EXPERIMENT – PŘÍPRAVA REALIZACE	49
5.1 Charakteristické parametry krátkodobého zkoušení	49

5.2	Popisné charakteristiky výběrových statistických souborů.....	50
5.3	Metodika zkoušení.....	51
5.3.1	Odběr a analýza vzorků	53
5.3.2	Spad ze vzduchu	53
5.3.3	Mikrobiologická analýza výluhu z filtrů	54
5.3.4	Mikrobiologické analýzy vody z ofukované vany	55
5.3.5	Způsoby měření fyzikálních veličin	56
5.4	Experimentální zařízení na výzkum filtrů	58
5.4.1	Ventilátorová filtrační věž.....	59
5.4.2	Ofukovaná vana.....	63
5.5	Zkoušené filtrační materiály.....	64
5.5.1	Nanovláknenné filtry	65
5.5.2	Běžně používané filtry.....	68
6.	KRÁTKODOBÝ EXPERIMENT – VÝSLEDKY A DISKUZE.....	71
6.1	Zkušební test T0	72
6.1.1	Výsledky testu T0.....	73
6.1.2	Získané poznatky ze zkušebního testu a jejich aplikace.....	74
6.2	Test T1	76
6.3	Test T2.....	79
6.4	Test T3.....	81
6.5	Test T4.....	83
6.6	Test T5.....	85
6.7	Test T6.....	86
6.8	Souhrnná diskuze nad výsledky testů.....	88
6.8.1	Charakteristika filtrů.....	89
6.8.2	Vliv prostředí a vnějších vlivů na výsledky testů.....	92
6.8.3	Vyhodnocení spadů	94
6.8.4	Vyhodnocení výluhů	98
6.8.5	Aplikace ofukované vany	100
7.	DLOUHODOBÝ EXPERIMENT – PŘÍPRAVA REALIZACE	101
7.1	Volba vhodného filtru a lokality pro dlouhodobý experiment	101
7.2	Popis stávajícího stavu	101
7.3	Provozní monitoring.....	103

8. DLOUHODOBÝ EXPERIMENT – VÝSLEDKY A DISKUZE.....	104
8.1 Vyhodnocení monitoringu.....	104
8.2 Diskuze k aplikaci nanovlákných filtrů v dlouhodobém experimentu	105
8.3 Využití poznatků dlouhodobého experimentu.....	106
9. ZÁVĚR	107
10. SEZNAM ZKRATEK.....	111
11. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY	112
12. SEZNAM OBRÁZKŮ	116
13. SEZNAM TABULEK.....	118
14. SEZNAM PŘÍLOH	119

1. Úvod

Voda je základem života na zemi. Její široké využití odpovídá hlubokému významu, který přináší. Voda v přírodě je bezprostředně ovlivňovaná svým prostředím, ze kterého si odnáší specifický charakter, a to jak po stránce fyzikálních vlastností, tak po stránce chemické a biologické. Tento vliv může být pozitivní i negativní. Negativní ovlivnění kvality vody má za následek její znečištění. Pozitivním ovlivněním je naopak taková úprava vody, která vede ke zvýšení jakosti. [34]

Vodárenská zařízení slouží k úpravě a dopravě vody, jejímu jímání, odběru, akumulaci a distribuci pro potřeby obyvatelstva a průmyslových závodů. Vyhlášky vztahující se ke kvalitě pitné vody jednoznačně uvádějí mezní hodnoty jednotlivých ukazatelů (viz Hygienické, mikrobiologické a hydrobiologické ukazatele dle vyhlášky Ministerstva zemědělství č. 252/2004 Sb.).

Jedním z médií, které se používají pro úpravu vody, je také vzduch. Nachází využití při odradonování, odkyselení, odželezování a odmanganování, i při dalších procesech. Při těchto procesech se využívá provzdušňovacích zařízení s mohutným vháněním vzduchu proti padajícímu proudu upravované vody. [22] Dalším procesem úpravy vody je flotace, která se využívá k separaci tuhých nebo kapalných částic z kapalné fáze. [5] Pokud vzduch není upraven a není zabráněno vstupu nesených kontaminujících částic, dojde k jejich zanesení až do akumulčních nádrží a rozvodného systému pitné vody. Jev, při kterém dochází k takovému přestupu nečistot z plynné do kapalné fáze, je označen jako sekundární kontaminace pitné vody. Oproti tomu primární kontaminace pitné vody je způsobena látkami již obsaženými ve vodě, případně změnou vlastností vody.

K sekundární kontaminaci vody dochází také prostřednictvím ventilačního systému. Pokud není vzduchotechnické zařízení osazeno vhodným filtrem, dochází k prostupu vzduchu do prostředí akumulace vody, která jím může být kontaminována. Vzduchem unášené rostlinné a živočišné zbytky přitom nemusí být zdraví škodlivé, ale mohou sloužit jako transportní podklad pro výtrusy, spory, mikroorganismy, mnohdy i jako substrát pro jejich množení.

Mikrobiologické oživení pitné vody se projeví i nárůstem biofilmu na stěnách akumulčních nádrží a dopravního potrubí, což vyžaduje vyšší četnost čištění a odkalování nádrží. [22]

Na sekundární kontaminaci vodárenských zařízení má velký vliv okolní prostředí, ve kterém se zařízení nachází. Bylo zjištěno, že např. blízkost frekventovaných silnic, zemědělských objektů a dokonce i pastvin má zásadní vliv na zvýšené množství výskytu vzdušných kontaminantů. [29]

2. Přehled současného stavu problematiky

Přehled současného stavu problematiky se zaměřuje na definování běžně dostupných filtrů vzduchu a jejich zatřídění, charakteristiku a vlastnosti nanotextilií, zabývá se vymezením vzdušné kontaminace vodárenských zařízení a definuje požadavky na návrh filtrů vzduchu pro tato zařízení, ať už z dosud používaných materiálů nebo z materiálů nanovláknenných.

2.1 Filtrace vzduchu

Vzduchový filtr slouží k separaci pevných částic z proudu protékajícího vzduchu, které jsou zadržovány na povrchu filtru nebo mezi filtračními vlákny prostřednictvím mechanismů filtrace. Filtry atmosférického vzduchu jsou nedílnou součástí odsávacích a odlučovacích systémů. Jejich použití pro vnitřní prostředí je vymezeno hygienickými požadavky danými Nařízením vlády č. 361/2007 Sb.

2.1.1 Třídění filtrů

Zatřídění filtrů se řídí dle norem ČSN EN 779 „Filtry atmosférického vzduchu pro odlučování částic u běžného větrání“ a ČSN EN 1822 „Vysoce účinné filtry vzduchu“. Tím je také dáno základní rozdělení na filtry běžné (někdy také nazývané filtry prachové) a vysoce účinné filtry (neboli filtry aerosolové). [12]

Běžné filtry

Zkoušení filtrů sestává z postupného měření tlakové ztráty, zkoušky na syntetický prach, zkoušky na počtovou odlučivost filtru pro kapalný aerosol DEHS v rozmezí velikostí částic 0,2 – 3,0 μm s tím, že pro zatřídění se používá kanál s intervalem velikostí, kde střední velikost částice je 0,4 μm . Zkouší se takové filtry, kde počáteční odlučivost pro částice velikosti 0,4 μm je menší než 98 %. Zkouška končí dosažením tlakové ztráty 250 Pa u hrubých filtrů třídy G nebo 450 Pa u jemných filtrů třídy F, případně pokud u dané dávky syntetického prachu je zjištěná odlučivost nižší než 75 % maximální hodnoty nebo 2 zjištěné hodnoty jsou nižší než 85 % maximální hodnoty.

Na základě takových zkoušek jsou filtry zařazeny do tříd:

- Hrubé filtry – střední odlučivost aerosolových částic E_m je menší než 40 %. Zatřídění takového filtru je následně provedeno podle střední odlučivosti na syntetický prach A_m .
- Jemné filtry – hodnota E_m je vyšší nebo rovna 40 %.

Roztřídění filtrů včetně jednotlivých parametrů je uvedeno v Tabulce 1. [12]

Tabulka 1 - Třídy běžných filtrů dle normy ČSN EN 779 [6]

Třída filtru		Odlučivost (hraniční hodnoty třídy)	
		A_m [%]	E_m [%]
Hrubý	G1	< 64.9	-
	G2	65 – 79.9	-
	G3	80 – 89.9	-
	G4	≥ 90	-
Jemný	F5	-	40 – 59,9
	F6	-	60 – 79,9
	F7	-	80 – 89,9
	F8	-	90 – 94,9
	F9	-	≥ 95

Vysoce účinné filtry

Pro zkoušení vysoce účinných filtrů jsou používány rozdílné metody než pro běžné filtry. Jsou založené na přímém počítání jednotlivých částic zkušebního aerosolu, případně je možné použít jiných přístrojů a používat monodisperzní aerosol s možností změny velikosti částic.

Samotné měření a třídění vysoce účinných filtrů je založeno na zjišťování odlučivosti částice, které filtračním materiálem i vlastním filtrem nejvíce pronikají, tzv. MPPS. Nejprve se zkouší filtrační materiál při jmenovité filtrační rychlosti a stanoví se velikost

částice MPPS prostřednictvím měření odlučivosti. Jako zkušební látka se využívá DEHS, DOP nebo parafínový olej. Poté následuje zkouška filtru s aerosolem, jehož střední velikost odpovídá zjištěné velikosti MPPS. Filtr se přitom zkouší jako celek (celková hodnota odlučivosti), od třídy H13 také prostřednictvím sondování napříč celým průřezem filtru (místní hodnota odlučivosti). Dle zjištěných hodnot je následně provedeno zařídění filtru, viz Tabulka 2. Přitom se velikost částice MPPS, podle které se vysoce účinné filtry začleňují, u většiny filtrů pohybuje v rozsahu 0,2 – 0,5 μm . [12]

Tabulka 2 - Třídy vysoceúčinných filtrů dle normy ČSN EN 1822 [7]

Třída filtru		Celková hodnota		Přípustná místní netěsnost	
		Odlučivost [%]	Průnik [%]	Odlučivost [%]	Průnik [%]
HEPA	H10	85	15	-	-
	H11	95	5	-	-
	H12	99,5	0,5	-	-
	H13	99,95	0,05	99,75	0,25
	H14	99,995	0,005	99,975	0,025
ULPA	U15	99,9995	0,0005	99,9975	0,0025
	U16	99,99995	0,00005	99,99975	0,00025
	U17	99,999995	0,000005	99,9999	0,0001

2.1.2 Použití filtrů

Zatřídění filtrů slouží především výrobcům pro vzájemné porovnání filtračních materiálů, ovšem pro běžného uživatele není identifikována odlučovací schopnost filtrů, podle které je možné předpokládat účinnosti odloučení typických částic, např. cigaretového kouře nebo organických příměsí, tedy pylů, plísní, bakterií, případně virů.

Z hlediska použití filtrů byli typizované tyto velikosti příměsí:

- Viry: 0,005 – 0,1 μm .
- Bakterie: 0,2 – 20 μm (většinou 0,5 – 1,5)
- Výtrusy hub, mechu, lišejníků a kapradin: 2 – 120 μm .

- Pyl: 10 - 200 μm .
- Plísně: 2 - 100 μm .
- Cigaretový kouř: 0,01 – 1 μm (střední hodnota 0,5)
- Olejová mlha: 0,04 – 1 μm .
- Saze: 0,01 – 0,5 μm .
- Kouř (ze spalování organické hmoty): 1 μm .

Při volbě filtrů se vychází jak z praktických zkušeností, tak tabulkových a grafických hodnot. Filtry G1-G5 by se měly využívat hlavně pro vláknitý prach, při vysokých koncentracích prachu, případně u zařízení, která mají malé tlakové rezervy. Pokud je potřeba zajistit, aby se mikroorganismy nedostávaly do chráněného prostoru, je nutné použít filtr minimální třídy F7. [12]

Obecně se používají několikavrstvé filtry, dle typu aplikace jsou následně voleny jednotlivé vrstvy. Platí zásada, že před jemnými filtry typu F předřazujeme hrubé filtry G, před filtry třídy H a U je potřeba předřadit filtry typu G a F (většinou F8 – F9). V takovém případě se jedná o dvou až třístupňový filtrační proces. Obecné použití filtrů:

- G1 – G2 (hrubé filtry)
 - Účinné pro vláknitý prach a pro částice větší než 10 μm .
 - Typické použití jako předfiltry, jednoduché okenní a podokenní klimatizátory, ochrana výměníků.
- G3 – G4 (hrubé filtry)
 - Účinné proti pylu a zvířenému prachu.
 - Ochrana výměníků, vytápěcí a větrací systémy průmyslových provozů, filtrace dopravních prostředků, garáží.
- F5 – F6 (jemné filtry)
 - Málo účinné proti sazím, olejové mlze, tabákovému kouři, částečně proti výtrusům a bakteriím.
 - Použití ve větracích a klimatizačních systémech škol, restaurací, hal, kancelářských budov, v průmyslu větrání provozů s vyššími nároky na čistotu (chemický průmysl, papírenství).

- F7 (jemné filtry)
 - Účinné proti bakteriím a výtrusům, částečně účinné proti sazím, olejové mlze, tabákovému kouři a kouři z technologických procesů.
 - Větrací a klimatizační zařízení pro laboratoře, nemocniční pokoje, kancelářské budovy, divadla, kuchyně, v průmyslu telefonní ústředny, potravinářství atd.
- F8 – F9 (jemné filtry)
 - Velmi účinné proti sazím, olejové mlze, tabákovému kouři a bakteriím.
 - Typické pro operační sály, zkušebny, laboratoře, provozy chemické a farmaceutické výroby.
- H10 (HEPA filtry, vysoce účinné)
 - Dobře účinné proti všem druhům prachů a aerosolů.
 - Typické pro metrologické laboratoře pro kalibraci, laboratoře pro optiku, elektroniku a biologii, pro operační sály, dodávka vzduchu pro jaderné elektrárny.
- H11 (HEPA filtry, vysoce účinné)
 - Velmi účinné pro všechny druhy prachů, aerosolů a virů.
 - Použití shodné s filtrem H10 pouze se využívá u náročnějších aplikací.
- H12 – H13 (HEPA filtry, vysoce účinné)
 - Vysoce účinné pro všechny druhy prachů, aerosolů a virů.
 - Základní filtr pro všechny čisté prostory třídy 100 – 100000 a s tím související aplikace v průmyslu, zdravotnictví a výrobě léků.
 - Používá se také v odsávacích systémech prostorů s výskytem nebezpečných aerosolů (jaderná energetika, zdravotnictví, biologické prostory).
- H14 a vyšší (HEPA filtr, vysoce účinné)
 - Vysoce účinné pro všechny druhy prachů, aerosolů a virů.
 - Použití pro filtraci vzduchu v čistých prostorách třídy 10 a lepších, případně u dodávek vzduchu do biotechnologií.

2.1.3 Teorie filtrace částic

Každou vláknitou vrstvu je možné charakterizovat několika základními veličinami:

- Tloušťka vrstvy (s), která v závislosti na druhu a účelu použití filtračního materiálu dosahuje hodnot od desetin mm až po jednotky cm.
- Poréznost (ε) nebo Objemové zaplnění (c), které jsou definovány jako poměr objemu vláken, resp. mezer, k objemu vrstvy. Musí proto platit, že $\varepsilon + c = 1$. Poréznost dosahuje v závislosti na druhu a účelu použití filtračního materiálu hodnot $\varepsilon > 0,8$ (u vysoce účinných filtračních materiálů až $\varepsilon > 0,9$).
- Střední aritmetický průměr vláken ($d_{N,1}$), který opět závisí na druhu a účelu použití filtračního materiálu. U vysoce účinných filtr dosahuje hodnot v řádech desetiny až jednotky mikrometru.

Frakční odlučivost izolovaného vlákna a vláknité vrstvy

Základem filtrace částic je odlučování částic ve vláknité vrstvě složené z filtračních vláken. Při filtraci dochází k odlučování částic na jednotlivých vláknech a následně i na již odloučených částicích. Protože se částice odlučují uvnitř vláknité vrstvy, jedná se o tzv. hloubkovou filtraci.

Při obtékání vláken se na odlučování částic současně podílejí tři hlavní odlučovací principy – difuze, intercepce a setrvačný princip. Tyto mechanismy působí odděleně anebo v určité kombinaci, přičemž působení jednoho z procesů je vždy dominantní. U vysoce účinné filtrace pro oddělení částic do $1 \mu\text{m}$ se přitom významně podílí difuze a intercepce, zatímco setrvačný princip je v této oblasti téměř zanedbatelný.

Důležitým parametrem, který předurčuje vlastnosti filtračního materiálu je tzv. parametr vrstvy. Čím je jeho hodnota vyšší, tím vyšších odlučivostí, lze filtrací dosáhnout. Zároveň je maximální hodnota parametru omezena tlakovou ztrátou filtrační vrstvy. [12]

$$\lambda = \frac{4 \cdot (1 - \varepsilon_p)}{\pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{s}{d_{N,1}} \quad (1)$$

kde: λ parametr vrstvy

ε_p poréznost (definuje poměrný objem vláken v objemu textilie)

s tloušťka vrstvy materiálu v mm

$d_{N,I}$ střední aritmetický průměr vláken

Výsledná závislost frakční odlučivosti vláknité vrstvy na velikosti částice vychází z odlučivosti na izolovaném vlákne, kdy platí:

$$O_f(a) = 1 - \exp[-O_{f,i}(a) \cdot \lambda \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2] \quad (2)$$

kde: $O_f(a)$ frakční odlučivost vláknité vrstvy

$O_{f,i}(a)$ frakční odlučivost vláknité částic na izolovaném vlákne

γ_1, γ_2 korekce kvality vláknité vrstvy a materiálových vlastností

Účinnost filtrace

Parametr účinnost filtrace udává odlučovací schopnost filtru na odlučování nečistot a příměsí ve vzduchu. Je daný závislostí frakční odlučivosti a charakterem znečištění atmosférického vzduchu pevnými a kapalnými částicemi. Je vyjádřena celkovou odlučivostí:

$$O_c = \frac{c_p - c_v}{c_p} \cdot 100 \quad (3)$$

kde: O_c celková odlučivost

c_p vstupní koncentrace částic před filtrem

c_v výstupní koncentrace částic za filtrem

Opakem celkové odlučivosti je parametr celkový průnik:

$$P_c = 1 / O_c \quad (4)$$

kde: P_c celkový průnik

Tlaková ztráta čisté vláknité vrstvy a filtru

Tlaková ztráta je významným parametrem. Jedná se o veličinu, která se v průběhu času mění tím, jak se filtr zanáší.

Tlaková ztráta čisté filtrační vrstvy vyjadřuje vlastnost filtračního materiálu, není ovlivněna okolními jevy. Jedná se o odporovou sílu působící na vlákna ve vrstvě při jejich obtékání vzduchem a z čelní plochy vláknité vrstvy:

$$\Delta p_{z,0} = K \cdot \frac{\eta \cdot s \cdot v_1}{(d_{N,2})^2} \quad (5)$$

kde: $\Delta p_{z,0}$ tlaková ztráta čisté filtrační vrstvy

K konstanta úměrnosti (závislá na velikosti Reynoldsova čísla)

η dynamická viskozita

v_1 filtrační rychlost (čelní rychlost vzduchu před vláknitou vrstvou)

$d_{N,2}$ střední kvadratický průměr vláken

Pro tlakovou ztrátu filtru je nutné kromě tlakové ztráty vlastního filtračního materiálu uvažovat i ztráty na vstupu a výstupu vlivem změny směru vzduchu u jednoduchých filtrů, u skládaných filtrů také ztráty třením při průchodu vzduchu jednotlivými štěrbinami vytvořenými filtračním materiálem nebo separátory vloženými mezi jednotlivé sklady. Zároveň je nutno si uvědomit, že u reálných filtrů neprotéká vzduch filtračním materiálem ideálně kolmo na jeho povrch, ale v závislosti na typu filtru pod určitým úhlem $\leq 90^\circ$. Vše má za následek, že změna tlakové ztráty filtru se změnou objemového průtoku není čistě lineární.

Při zanášení filtru dochází nejen k výrazné změně tlakové ztráty, ale také může docházet ke změně jeho odlučivých vlastností. Samotné zanášení filtrů v průběhu času je nutné určit experimentálně pro každý daný filtr a konkrétní podmínky jeho použití, tj. filtrační rychlost i charakter odlučovaných příměsí.

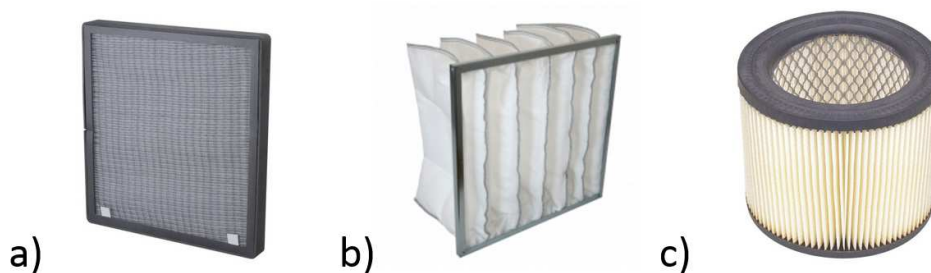
Při zanášení vláknité vrstvy odloučenými částicemi se postupně snižuje poréznost vrstev a tím se zvyšuje rychlost vzduchu ve vrstvě a následně i dynamický účinek proudu na již odloučené částice. Po počátečním nárůstu celkové odlučivosti se zanášením, které lze vysvětlit zvyšováním hodnoty parametru vrstvy λ , dochází při dalším zanášení zejména u filtrů pro běžné větrání k jejímu postupnému snižování vlivem strhávání odloučených částic, které tak postupně "prorůstají" vláknitou vrstvou. Z těchto důvodů se u filtrů atmosférického vzduchu omezuje nárůst tlakové ztráty na určitou hodnotu $\Delta p_{f,max}$, např. dvojnásobek počáteční tlakové ztráty $\Delta p_{f,0}$ nebo ze zkušeností stanovenou určitou

konkrétní hodnotu. Hmotnost zachyceného prachu, která odpovídá dané hodnotě maximálního nárůstu tlakové ztráty, se nazývá jímavost filtru. Při známé vstupní koncentraci příměsí lze z této hodnoty odhadnout životnost filtru, tj. dobu jeho provozu do následné výměny. [12]

2.1.4 Provedení filtrů vzduchu

Se zvyšující třídou filtrů se postupně zvyšují nároky na odlučovací schopnosti filtrů a mění se proto jak struktura vlastního filtračního materiálu a požadavky na jeho jímavost, tak filtrační rychlost. Uvedené změny se zákonitě zobrazují v rozdílném provedení těchto filtrů. Podle provedení lze filtry pro běžné větrání v zásadě rozdělit na filtry vložkové a pásové, filtry vysoce účinné jsou vesměs vložkové.

- Vložkové filtry – filtr je tvořen z jednotlivých vyměnitelných vložek, které se vkládají a uchycují buď do skříní, nebo rámců. Počet těchto paralelně řazených vložek závisí na objemovém průtoku filtrovaného vzduchu a určuje velikost sestavy. Vložkové filtry se podle provedení v zásadě dělí na:
 - Deskové (rámečkové) – mají podobu plochých desek, které se zasouvají čelně nebo bočně do skříně. Tyto skříně se následně osazují na potrubí anebo tvoří filtrační stěnu.
 - Kapsové – materiál je ušit do tvaru hlubokých kapes, které se dle požadavku na objemový průtok liší šířkou a hloubkou, tak aby byla zajištěna jmenovitá filtrační rychlost.
 - Skládáné – dle provedení se skládané filtry dále dělí na filtry kompaktní, kazetové a patronové.



Obrázek 1 - Příklady filtrů: a) Deskový b) Kapsový c) Skládáný kazetový filtr

- Pásové odvinovací filtry – filtrační člen je tvořen pásem filtračního materiálu, který se podle snímané tlakové ztráty filtru postupně odvinuje. Filtrační materiál zde bývá silnější filtrační rohož ze syntetických materiálů nebo rouno ze skleněných vláken. S ohledem na strukturu materiálu a vyšší filtrační rychlosti se tyto filtry zpravidla používají pouze pro nižší třídy filtrace do třídy G3.



Obrázek 2 - Pásový odvinovací filtr

Vláknité filtrační materiály, které tvoří převážnou část filtračních materiálů, se podle technologie výroby dělí na:

- Rohože – jsou tvořeny silnějšími syntetickými nebo skleněnými vlákny, která jsou pro zlepšení vzájemné soudržnosti spojena impregnační látkou (pojivem) nebo v případě syntetických vláken tepelným zpracováním. Na výstupní straně rohože bývá často na vrstvu nanесena tenká pevnější pojená vrstva, která slouží ke zlepšení mechanických vlastností materiálu a rovněž zabraňuje průniku větších částic vrstvou.
- Rouna – jsou složena z jemnějších minerálních (např. skleněných), syntetických nebo organických (např. celulózových) vláken, která jsou nanесena na nosný pojený podkladový materiál, který zároveň slouží na čisté straně jako ochrana proti průniku úlomků vláken do vzduchu. U některých výrobců je tenká pojená zpevňující vrstva nanесena i na vstupní straně vrstvy.

- Vpichované textilie – tyto filtry jsou tvořeny syntetickými (polyesterovými) vlákny, která jsou pro zlepšení soudržnosti ve vrstvě vzájemně propojena pomocí vpichovací technologie.
- Filtrační papíry – sestávají z jemných skleněných nebo organických vláken, jsou vyráběné papírenskou technologií.

Rouna i rohože mohou být provedena ve formě vrstveného materiálu, kde vláknitá vrstva je tvořena ze dvou nebo i více vrstev stejného nebo i různého materiálu různé struktury. Vstupní strana je tvořena vrstvou hrubšího filtračního materiálu a slouží k zachycení větších částic s větší jímavostí a ve vrstvě jemnějších vláken se odlučují menší částice s menší jímavostí. Filtr z vrstveného filtračního materiálu tak nahrazuje sériové řazení dvou filtrů různé třídy filtrace.

Kromě vláknitých filtračních materiálů existují pro nižší třídy filtrů i porézní syntetické materiály a pro nejnižší třídy filtrů i materiály ve formě omyvatelných kovových nebo plastových náplní ve tvaru zrn, tělísek, třísek do deskových vložkových filtrů. [12]

2.1.5 Sorpční filtry

Sorpční filtry jsou specifickou aplikací vzdušných filtrů. Fungují na principu adsorpce, tedy k zachytu plyných znečišťujících látek, ale také pachů prostřednictvím adsorpční látky s velkým úměrným povrchem až $1250 \text{ m}^2/\text{g}$, daným rozvinutou strukturou jemných trhlin a vnitřních pórů. Základními sorpčními látkami jsou aktivní uhlí, aktivní koks, saze, silikagel a podobně. Sorpční schopnost závisí na kvalitě účinného materiálu a dosahuje až 30 % (výjimečně 50 %) hmotnosti náplně při zachování vysoké účinnosti zachytu a téměř neměnné tlakové ztrátě vrstvy. Tyto filtry je nutné chránit před zanášením, např. předřazením filtrů minimální třídy F7.

Různé druhy sorpčních náplní jsou využívány dle potřebného zaměření filtrů. Aktivní uhlí je vhodné zejména pro zachycení např. organických látek, pachů, toluenu. Sorpční filtry chráněné před zanášením prachem je možné dále regenerovat a následně znovu využít. [12]



Obrázek 3 - Příklad sorpčního filtru

2.1.6 Dielektrické filtry a elektrofiltry

K odloučení jemných částic z atmosférického vzduchu lze využít i elektrických sil působících na nabité částice v elektrickém poli. Výhodou takových filtrů je minimální tlaková ztráta a nízký elektrický příkon (20 – 50 W na 1000 m³/h čištěného vzduchu)

Tyto procesy využívají dielektrické filtry, kde k odlučování částic dochází ve vláknité vrstvě z elektricky nevodivého filtračního materiálu, která se nachází v elektrickém poli mezi vhodně upravenými elektrodami. Dielektrické filtry se používají u recirkulačních filtračních jednotek k čištění vzduchu uvnitř místností.

S elektrickými silami pracují také elektrofiltry, přesněji dvouzónové elektrické odlučovače, kde ionizační část tvořená soustavou drátových vysokonapěťových elektrod umístěnou mezi uzemněnými deskovými elektrodami. Ionizační část je oddělena od části odlučovací. U těchto zařízení vzniká korónový výboj a kladné plynné ionty. Částice se při průchodu ionizační částí nabíjejí kladně a vstupují do odlučovací části tvořené zápornými elektrodami. Vzniká zde homogenní elektrické pole o vysoké intenzitě. Elektrofiltry účinně odlučují jemné částice a podle provedení lze jejich účinnost srovnat s filtry třídy F7 – F9. Využívají se u jednotkových odsávacích zařízení v průmyslu (obrobny, svařovny). Předřazuje se jim hrubý filtr třídy G. [12]

2.2 Charakteristika a vlastností nanotextilií

2.2.1 Názvosloví

Textilie sestávají z vláken, podélných útvarů, které jsou charakteristické ohebností, jemností, s vysokým poměrem délky k průřezu. Jako nanovlákná se označují takové

útvary, jejichž jeden rozměr (průměr) je menší než 0,1 mikrometru (odpovídá 100 nanometrů). Standardně se průměry nanovláken pohybují v rozmezí 1 – 100 nanometrů, tedy 10^{-7} - 10^{-9} metru. [42] Pro ilustraci, rozměry jednotlivých atomů jsou řádově 10^{-10} m. Nanočástice mohou mimo nanovláken různým prostorovým uspořádáním vytvářet nanodrátky, nanotrubičky, nanokompozity, keramické nebo jiné tenké vrstvy a filmy. Jejich základní vlastností je vysoký poměr plochy povrchu k objemu částic, kdy poměr atomů vytvářejících povrch nanočástic je mnohonásobně vyšší než počet atomů uvnitř částice, což ovlivňuje chemické a fyzikální vazby na hranicích částic. Chování nanočástic se tak vzhledem k minimálním rozměrům neřídí zákonitostmi běžné fyziky, ale zásadami fyziky kvantové s novými možnostmi chování látek. [36]

Jako surovina pro výrobu nanovláken je v současnosti využíváno přibližně 100 druhů syntetických a přírodních polymerů. Polymerem se rozumí látka sestávající z molekul charakterizovaných mnohonásobným opakováním jednoho nebo více druhů atomů (konstitučních jednotek) navzájem spojených v tak velkém počtu, že existuje řada vlastností, které se znatelně nezmění přidáním či odstraněním jedné nebo několika konstitučních jednotek. [3]

Materiály, u jejichž názvu je možné používat předpony nano, jsou specifikovány nejednotně různými komisemi a normami, např. kanadským ministerstvem zdravotnictví, australskou vládní agenturou NICNAS, ISO normou atd. Nejčastěji používaná definice nanomateriálů byla vytvořena pro potřeby Evropské komise, kdy je jako nanomateriál uvažován takový materiál, který splní alespoň jednu z následujících podmínek:

- Obsahuje alespoň 1 % z částic, jejichž jeden a více vnějších rozměrů se pohybuje v rozmezí 1 – 100 nanometrů.
- Jeho vnitřní nebo povrchová struktura se pro jeden a více rozměrů pohybuje v rozmezí 1 – 100 nanometrů.
- Jeho specifický povrch je větší než $60 \text{ m}^2/\text{cm}^3$. Nepatří sem materiály, které jsou tvořeny částicemi menšími než 1 nm. [11]

Geometrické dělení materiálů dle převažujícího rozměru:

- 0D = nanoelementy, nanočástice (všechny rozměry jsou v oblasti nano)
- 1D = nanovláčka a nanotrubička (jeden převažující rozměr)

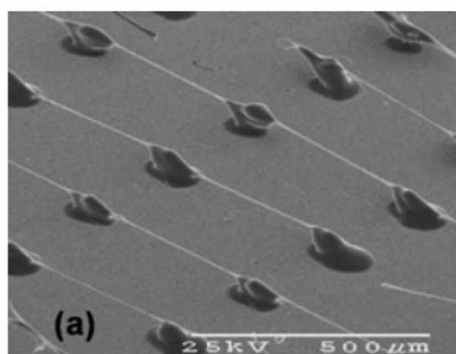
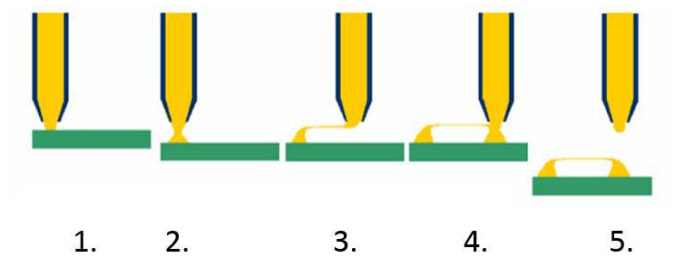
- 2D = nanodesičky (dva převažující rozměry)
- 3D = kombinace výše uvedených elementů do dílčích prvků

2.2.2 Výrobní technologie

Metoda na výrobu v nanovláknenných materiálu byla popsána již na počátku 20. století, v rámci patentové přihlášky na výrobu jemných vláken pomocí metody elektrostatického zvlákňování, kdy jsou kapaliny rozptylovány prostřednictvím vysokého napětí. Pokusy o výrobu nanovláken byly realizovány od třicátých let minulého století, první výrobky v osmdesátých letech.

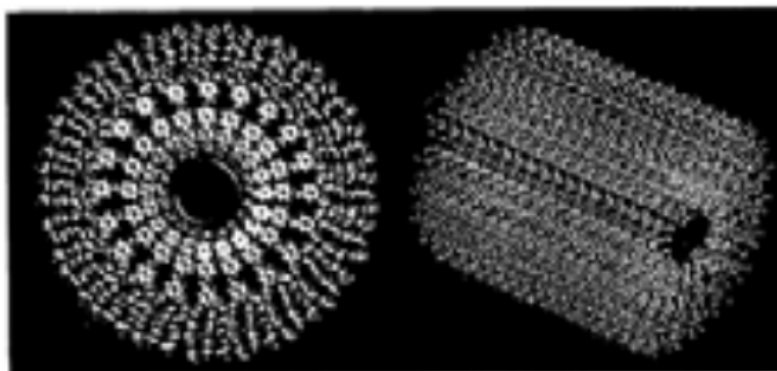
Nanovláknna se v současné době zpracovávají pouze ve formě netkaných textilií, tedy tvorbou vrstev z náhodně uložených vláken. Nejčastějšími výrobními technologiemi jsou:

- Elektrostatické zvlákňování – nejběžněji používaná metoda, bude detailně popsána v následující kapitole.
- Předání průtahem – metodika je podobné výrobě standardních syntetických vláken. Vlákno se vytváří tahem podkladu, viz Obrázek 4.



Obrázek 4 - Výroba nanomateriálu průtahem [16]

- Template synthesis - používá se pro výrobu dutého vlákna. Využití šablony nebo membrán k získání nanomateriálů. V současnosti je metoda používaná pouze laboratorně. Je možné řídit průměr vláken. Využívá se pro tvorbu materiálů ze speciálních polymerů – např. oxidů kovů (oxid hlinitý).
- Fázová separace (Phase separation) – touto metodou se nejprve vytváří homogenní roztok, jehož malé množství je nalito do teflonové nádoby, kde je dosaženo teploty gelace. Rozpouštědlo je následně vymýváno vodou, gel je vyjmut z nádoby a vysušen. Přímo se vyrábí nanovláknenné vrstvy. Opět se jedná pouze o laboratorní výrobu, není možné řídit rozměry nanovláken.
- Samosestavování (Self-assembly). Nanovláknna jsou budována z menších molekul. Metoda je využívána pouze laboratorně. Není možné řídit velikost průměru nanovláken, je vhodné pouze pro určité rozmezí průměrů a délek. Touto metodou mohou vznikat velmi jemná vlákna (7 – 100 nm v průměru) o délce stovek nanometrů. Příklad typického koncentrického uspořádání viz Obrázek 5.



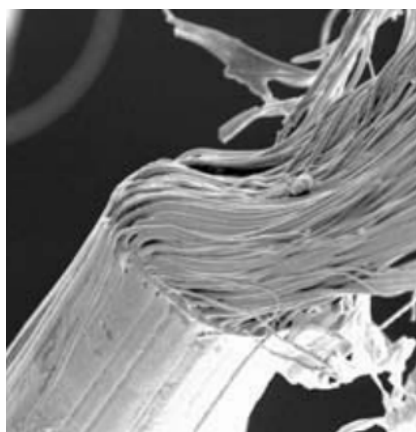
Obrázek 5 - Nanomateriál vytvořený samosestavováním [16]

- Melt blown – základem je foukání taveniny prostřednictvím tavícího extrudéru a dávkovacího čerpadla. Vyžívá se horkého vzduchu pro usměrnění proudu vláken, které jsou zachytávány na síťovém bubnu – kolektoru a následně navíjeny. Využívá se pro speciální typy polymerů (high MFI polypropylen). Průměr vláken je ca. 250 nm, převládají nekonečná vlákna. Tato metoda je využívána i průmyslově, viz Obrázek 6.



Obrázek 6 - Nanomateriál vytvořený metodou melt-blowing [16]

- Islands in the Sea – princip vláken ve vlákně, kdy se vytváří bikomponentní vlákna. Příklad takového vlákna z polymeru POP/PVA o průřezu 500 nm je zobrazen na Obrázku 7.



Obrázek 7 - Nanomateriál vytvořený metodou Islands in the Sea [16]

Rozdíly mezi jednotlivými metodami výroby nanomateriálů jsou shrnuty spolu s výhodami a nevýhodami v následující tabulce.

Tabulka 3 - Charakteristické metody výroby nanomateriálů [16]

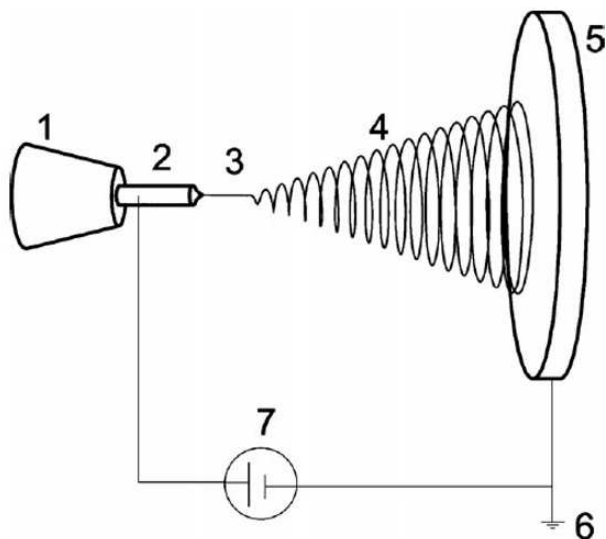
Metoda výroby	Typ výroby	Průměr vláken v nm	Výhody	Nevýhody
Elektrostatické zvlákňování	Prům.	50 - 500	Velké množství polymerů, nekonečná vlákna	Vysoké napětí, nestabilita procesu
Předení průtahem	Labor.	2 – 100	Velmi jemná vlákna	Diskont. proces, nízká produktivita
Template synthesis	Labor.	100	Přesné rozměry vláken dle šablon	Speciální šablony
Fázová separace	Labor.	50 – 500	Přímá výroba nanovlák. vrstvy	Pouze pro určité polymery
Samosestavování	Labor.	7 – 100	Velmi jemná vlákna	Velmi složitý proces
Melt-blown	Prům.	≥ 250	Vysoká produktivita výroby	Pouze určité polymery
Islands in the Sea	Prům.	≥ 500	Řiditelné rozměry vláken	Nutné další zpracování, Pouze určité polymery

2.2.3 Elektrostatické zvlákňování

Elektrostatické zvlákňování (tzv. electrospinning) je nejčastěji používanou metodou produkce nanovlákných struktur z polymerního roztoku nebo polymerní taveniny pomocí elektrostatických a kapilárních sil. Použity mohou být jak přírodní, tak syntetické polymery.

Pro přípravu nanovláken se využívá vysokého napětí k vytvoření elektricky nabitého proudu polymeru. Zdroj napětí je spojen přímo s polymerem a protielektroda, nazývaná „kolektor“, je uzemněna. Zdroj vysokého napětí vytváří elektrostatické pole, které formuje elektricky nabitý proud polymerního roztoku či taveniny, který je vypuzen z kapiláry. S rostoucí intenzitou elektrického pole, se kulovitý tvar kapaliny na hrotu kapiláry prodlouží a vzniká kónický tvar známý jako Taylorův kužel, který se vytváří následkem relaxace indukovaného náboje na volném povrchu kapaliny na výstupu ze zvlákňovací trysky. Během fáze letu polymeru, která je označována jako „bičovací“, se polymerní proud postupně enormně napíná a dochází k vytvoření velice jemných vláken

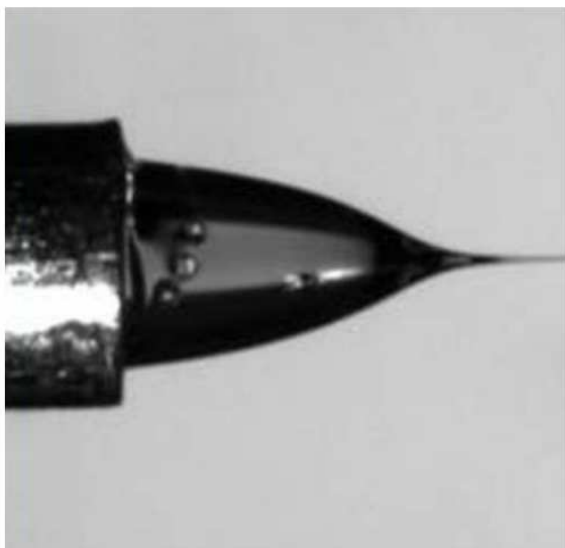
(nanovláken). Schematicky je postup znázorněn na Obrázku 8. Dosud jsou známé tři metody zvlákňování – z trysky, z válečku a z tyčky. [21]



Legenda:

1. Dávkovací zařízení
2. Kapilára - elektroda
3. Polymer vytváří Taylorův kužel přecházející v jemné vlákno
4. Polymer v bičovací fázi letu
5. Kolektor
6. Zemnění
7. Zdroj vysokého napětí

Obrázek 8 - Elektrostatické zvlákňování z trysky, schéma [21]



Obrázek 9 - Taylorův kužel (levá část); Bičovací fáze letu (pravá část) [16]

Celý proces je založen na působení dvou antagonistů, elektrostatických a kapilárních sil. Elektrostatické síly způsobují deformaci tvaru polymeru, zatímco kapilární síly udržují částice pohromadě kvůli zachování minimálního povrchu a povrchové energie.

Dezintegrace probíhá dvěma způsoby v závislosti na vnitřní molekulární struktuře. Jednoduché kapaliny tvořené malými molekulami jsou rozptýleny do mraku drobných nabitých kapiček, které mají tendenci se dále rozpadat na menší struktury. Kapaliny s vyšší viskozitou, především pak polymerní roztoky a polymerní taveniny se složitější strukturou makromolekul, se rozpadají na dlouhá tenká vlákna. Vnitřní tlak způsobený vysokou koncentrací nabitých částic tím nutí tyto polymery se protahovat podélně, dále zužovat svůj průřez a zároveň vytlačovat další molekuly z kapiláry. [21]

Standardní proces elektrostatického zvlákňování byl různě modifikován, např. metoda koaxiálního elektrostatického zvlákňování, případně metoda side-by-side, které umožňují vznik atypických nanovláknenných struktur - nanosmyček nebo nanopružin.

Typický proces elektrostatického zvlákňování s využitím trysek je možné charakterizovat následně:

- Polymery jsou vytlačovány z trysky, hydrostatický tlak působící na trysku je variabilní.
- Napětí: 5 – 20 kV.
- Separace prostřednictvím Talyora kuželu je nastavena mechanicky pomocí vzdálenosti jehel.
- Koncentrace polymeru: 10 %.
- Průměr vlákna: 80, 100, 150, 200, 250 nm a více. [19]

2.2.4 Morfologická charakteristika

Polymery pro přípravu nanomateriálů metodou elektrostatického zvlákňování jsou používány především ve formě roztoků, případně jako tavenina. Hlavní roli ve výběru vhodného polymeru hrají permitivita, vodivost, polarita, viskozita, povrchové napětí, rozpustnost a především kvalita rozpouštědla. Polymery jsou připravovány rozpouštěním v rozpouštědlech anebo ve směsi rozpouštědel. Rozpouštědla jsou definována jako:

- Dobrá rozpouštědla – polymerní řetězce nebo smyčky se rozpínají.
- Špatná rozpouštědla – využívají se pro kompaktní řetězce polymeru [21]

Oproti běžně používaným materiálům mají nanomateriály rozdílnou strukturu i vlastnosti. Pro jejich morfologickou charakteristiku je proto potřeba využít specifických metod, jako

jsou např. zobrazovací metody (optická mikroskopie, elektronová mikroskopie, mikroskopie atomárních sil), rtuťová porozimetrie, BET měření povrchu, měření kontaktního úhlu. [33]

2.2.5 Základy elektrohydrodynamiky

Elektrospinning je ve své podstatě součástí fyzikálních jevů zahrnutých do vědního oboru zvaného elektrohydrodynamika. Tento obor se zaměřuje na distribuci a interakce iontů v roztoku a jejich změny způsobené vlivem elektrického pole. Popisuje jevy známé jako elektroforéza, elektroosmóza, elektrokapilarita a elektrodifúze.

Základním zákonem elektrohydrodynamiky je Coulombův zákon vyjadřující vztah mezi elektrickým nábojem a elektrickou silou, kde velikost elektrické síly, kterou na sebe působí dvě tělesa s elektrickým nábojem, je přímo úměrná velikosti nábojů q_1 a q_2 a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti:

$$\vec{F} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (6)$$

kde: F elektrická síla
 $q_1; q_2$ velikost nábojů
 r vzdálenost nábojů
 ε elektrická permitivita

Elektrická síla jednotného pole se nazývá síla elektrického pole (případně intenzita elektrického pole) a je specifikována jako podíl síly ku náboji:

$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{F}}{q_1} \quad (7)$$

kde: E_1 intenzita dílčího elektrického pole

Výsledná síla elektrostatického pole je sumou energie všech dílčích nábojů:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_i \quad (8)$$

kde: E celková intenzita elektrostatického pole

Spolu s elektrostatickými silami působí na polymer síly kapilární. Kapilární síly způsobují, že se částice uvnitř polymeru shlukují tak, aby vytvořily minimální povrch s minimálním povrchovým napětím, tedy aby vzdálenosti mezi molekulami byli co nejmenší.

Tyto síly jsou ovlivněny velikostí povrchového napětí, kontaktním úhlem a povrchem:

$$F_c = o \cdot \gamma \cdot \cos \theta \quad (9)$$

kde: F_c kapilární síly

o délka zakřiveného povrchu ($2 \cdot \pi \cdot r$)

γ povrchové napětí

θ kontaktní úhel vektoru povrchové napětí vůči zakřivení povrchu

Kapilární tlak vytvářený kapilárními silami je vyjádřen rovnicí:

$$p_c = \frac{\gamma}{(R_1 + R_2 + \dots + R_i)} \quad (10)$$

kde: p_c kapilární tlak

R_1, R_2, \dots zakřivení dílčích povrchů

Další veličinou je elektrický tlak, který je charakterizován jako síla elektrického pole na povrchu polymeru:

$$p_e = 0,5 \cdot \varepsilon \cdot E^2 \quad (11)$$

kde: p_e tlak elektrického pole

Pokud tlak elektrického pole dosáhne hodnoty kapilární tlaku, potom začne probíhat proces elektrostatického zvlákňování. Jedná se tedy o základní podmínku celého procesu:

$$p_e \geq p_c \quad (12) [21]$$

2.2.6 Obecné vlastnosti nanovláknenných materiálů

Nanovláknenné materiály mají specifické vlastnosti, kterými se odlišují od běžně používaných materiálů. Je to zejména velký specifický povrch, vysoká porozita, malá velikost pórů a nízký průměr vláken (50 – 1000 nm). [37]

Díky svým vlastnostem je využitelnost nanomateriálů velice pestrá. Různé formy materiálů nacházejí uplatnění v rozdílných aplikacích:

- Nanokeramika – nanokeramika se využívá jako kompozitní materiál v chemicko-fotokatalytických aplikacích.
- Nanokovy – antimikrobiální materiály, vodivé vrstvy obrazovek, senzory. Uplatňují se také energetice.
- Nanoporézní materiály – elektronika, optika, biomedicína.
- Nanotrubice – elektricky vodivé nanokompozity, elektronika.
- Masivní nanomateriály – povrchová ochrana materiálů, kosmický průmysl, automobilový průmysl.
- Dendrimery (=opakovaně větvené molekuly) – medicína, kosmetický průmysl.
- Nanodráty – vodivá vrstva obrazovek nebo solárních panelů, elektronika.
- Fullereny (molekuly tvořené atomy uhlíku) – kosmetický průmysl, nanokompozity. [39]

2.2.7 Rizika použití nanovláknenných materiálů

Toxicita materiálů bývá přímo úměrná množství toxických látek, jimž je organismus vystaven. U nanomateriálů není množství nejdůležitějším parametrem, tím je specifický povrch, počet částic, koncentrace, velikost, stav povrchu z hlediska kontaminace a elektrického náboje, stupeň aglomerace částic, místo usazování v plicích, porozita, tvar, krystalická struktura atd. Bylo zjištěno, že při stejném množství jsou toxické látky strukturované ve formě nanočástic více škodlivé než produkty stejné chemické povahy uspořádané do fragmentů větších velikostí.

Provedené studie na téma toxicity nanomateriálů popisují dva hlavní parametry toxicity:

- Oxidačně-stresová indukce – na povrchu kovových nanomateriálů se vytváří velké množství kyslíku ve formě volných radikálů. Tyto molekuly jsou vysoce reaktivní a mohou poškozovat stěny buněk a způsobovat záněty nebo fibrózu. Mohou také nepříznivě ovlivnit DNA buněk.
- Povrchová adsorpce biologicky aktivních molekul – vzhledem k vysoké hodnotě specifického povrchu mohou nanomateriály adsorbovat biologicky aktivní molekuly, a tím buňky ohrozit. [11]

Toxicita nanomateriálů je často diskutované téma, jehož výzkum stále probíhá. Na druhou stranu, v zásadě všechny chemické sloučeniny (včetně vody) mohou být toxické, pokud dojde k jejich požití v nadměrném množství. [10]

Pro ilustraci, stejné materiály jsou používány také jako jeden z filtrů v dýchacích maskách a ostatních prostředcích osobní ochrany, případně ve zdravotních obvazech, kdy nanovláknenné tkaniny umožňují přístup vzduchu k otevřené ráně a současně jí chrání před bakteriemi. [40]

Pro vzdušné filtry jsou využity takové materiály, jejichž charakteristika neohrožuje zdraví přímo ani nepřímo. Všechny nanovláknenné materiály použité ve vzduchových filtrech mají atest pro použití ve vodárenských zařízeních. [35]

2.3 Vzdušná kontaminace obytných prostor

Problematika vzdušné kontaminace obytných prostor se zaměřuje na zkoumání vlivu vnějšího prostředí na osoby, které se v prostorách nacházejí, na jejich zdraví, pracovní efektivitu, apod. Tato tematika je v rámci vzduchotechnického oboru shodně s oborem vodohospodářským na okraji zájmu. [23]

Vzduchotechnika běžných aplikací (budov, kanceláří) je navrhována za účelem přivádění čerstvého vzduchu do vnitřních prostor a udržování vhodného mikroklimatu. Toto mikroklima má přímý vliv na zdraví osob, které se v něm pohybují. Přitom udržení vhodné relativní vlhkosti vzduchu je základním opatřením proti růstu mikroorganismů, jako jsou bakterie a plísně. Přítomnost většího množství vodní páry je rizikovým faktorem jejich růstu. [4]

V současné době je pro Českou republiku dle Vyhlášky 6/2003 požadován pro vnitřní prostředí pobytových místností veřejných staveb limit koncentrace bakterií a plísní 500 KTJ/m³ při stanovení koncentrace prostřednictvím aeroskopu. [30]

Používanými metodami sběru vzorků ve vnitřním prostředí jsou:

- Sedimentační (spadová) metoda – prostá sedimentace bioaerosolu na živnou půdu umístěnou v Petriho misce.
- Impaktní (aeroskopická) metoda – proud vzduchu je nasáván přes zúžený profil na otáčející se Petriho misku s živnou půdou.
- Impingerová metoda – vzduch je prosát tryskou ponořenou do kapaliny, kde se zachycují mikroorganismy.
- Filtrační metody – principem je záchyt mikroorganismů na různých typech filtrů. [15]
- Stanovení počtu mikroorganismů na površích – odběr je prováděn stěry nebo otisky z definované plochy.
- Stanovení koncentrace prachu – jsou snímány prашné povrchy, přičemž prach je živnou půdou pro mikroorganismy. [23]

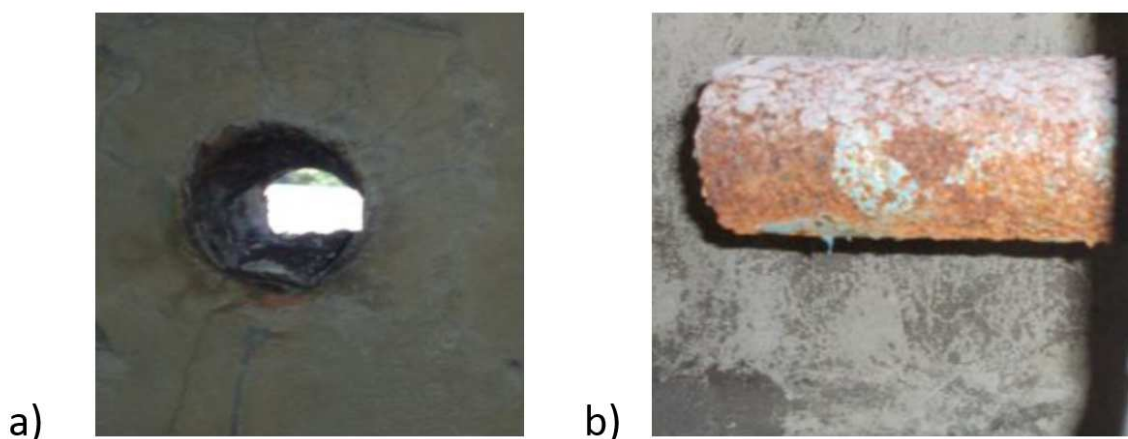
2.4 Vzdušná kontaminace vodárenských zařízení

2.4.1 Úvod do problematiky

V předchozí kapitole je popsána vzdušná kontaminace vnitřních prostor. Hlavním cílem je přitom ochrana osob, které se v prostředí nacházejí. Tato kapitola se zabývá vzdušnou kontaminací vodárenských zařízení. Cílem je ochrana pitné vody a zařízení sloužících pro její akumulaci před znečištěním.

Kontaminaci pitné vody prostřednictvím vzduchu ve vodárenských objektech je možné pozorovat jak přímo ve vodě, tak i na sedimentech, které ulpívají na površích vodních nádrží. Tyto procesy jsou označovány jako sekundární kontaminace, kdy dochází k znečištění pitné vody, která se dostává do kontaktu s polutanty přenášenými vzduchem do prostoru vodárenských zařízení. [26]

Výzkumy eliminace sekundární kontaminace poukázaly na potřebu zajistit vodárenské objekty před vzdušnou kontaminací. V rámci studie Jany Říhové Ambrožové byly popsány prvky stávající ochrany u různých vodojemů a výsledná kontaminace objektů. Tato kontaminace byla stanovena počtem mikroorganismů v jednotkách KTJ na základě expozice misek s živným médiem po dobu 20 minut. Výsledky měření popisují, jak může ovlivnit způsob osazení filtrů a konstrukční řešení vodojemů sekundární kontaminaci objektů. Bylo zjištěno, že počet mikroorganismů je nulový u vodojemů s nainstalovanými filtry na přívodním vzduchovém potrubí odpovídajícím normě. Naopak počet mikroorganismů u vodojemů s ochranou částečnou případně vůbec žádnou, byl naměřen zvýšený (řádově desítky KTJ) respektive nadměrný (misky byly přerostlé, nad rámec možného sčítání). Ochrana takových vodojemů spočívala pouze v jemné mřížce, případně byly průduchy zcela nechráněné nebo nevhodně technicky řešené (armaturní a akumulací komora nebyly oddělené), viz Obrázek 10. [27]



Obrázek 10 - Vzdušná kontaminace; a) Nechráněný průduch b) Vzduchotechnická trouba zrezivělá, nechráněná, ústící nad akumulací prostor [27]

Přesný stav aktuálně používaných filtrů ve vodárenství není podrobně analyzován. Dle dostupných podkladů, na základě rešerše odborné literatury a dle odpovědí provozovatelů vodovodních sítí je možné sumarizovat následující aplikace prvků ochrany před sekundární kontaminací seřazených do skupin A až D, tedy od nejméně chráněných aplikací (Skupina A) po nejlépe chráněné (Skupina D):

- Skupina A: Chybí jakákoli ochrana před sekundární kontaminací pitné vody.

- Skupina B: Využití jednovrstvých hrubých filtrů, filtrační třída G
- Skupina C: Využití jednovrstvých jemných filtrů, filtrační třída F
- Skupina D: Využití vícevrstvých jemných filtrů filtrační třída F nebo H [27]

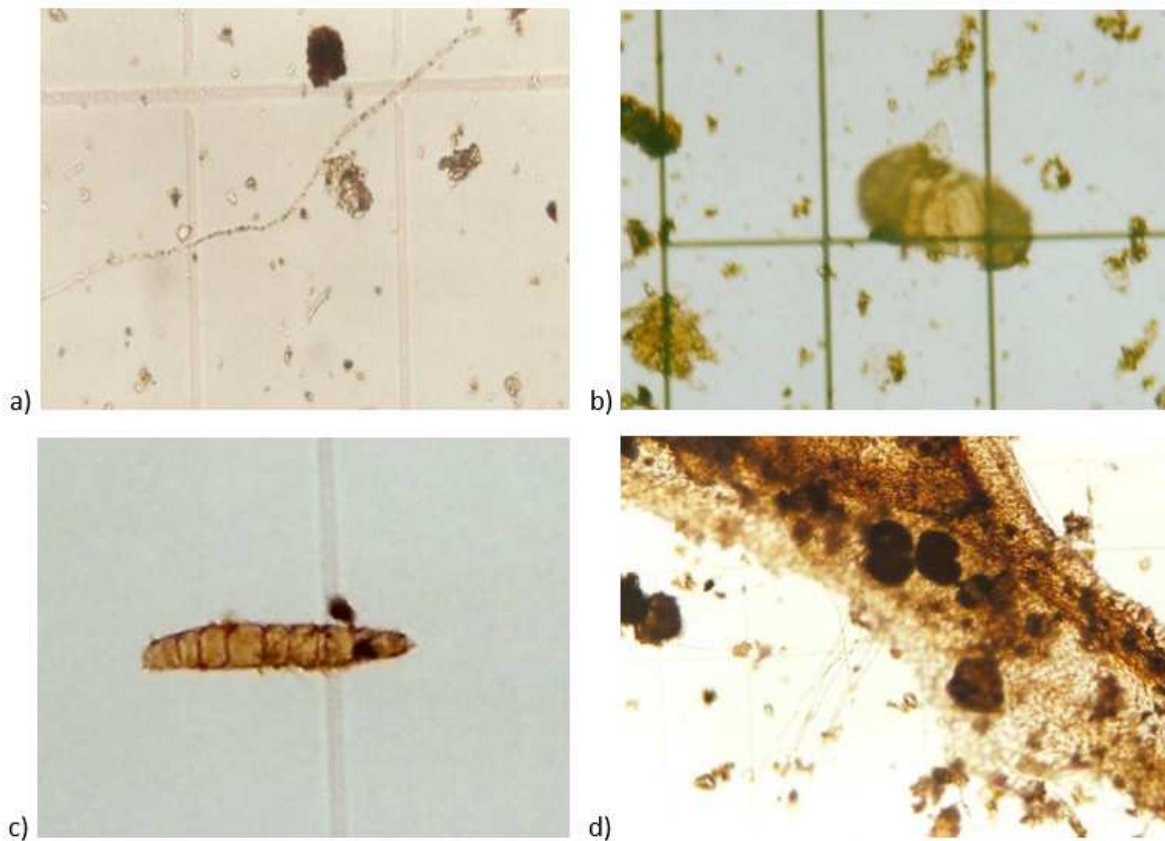
2.4.2 Biologická problematika provozu vodárenských zařízení

Popsané výsledky dokazují negativní vliv nezajištění objektů před přímou vzdušnou kontaminací. Negativní dopad sekundární kontaminace byl podrobněji sledován při mnoha hloubkových biologických auditech vodárenských soustav. Audity byly zaměřeny převážně na vodojemy, u kterých se za provozu přímo z nádrží odebíraly vzorky vody z příhlahlinové vrstvy a vzorky stěru ze stěn pomocí molitanu. Soustavným biologickým sledováním byl podložen předpoklad negativního působení vzdušné kontaminace v prostorách akumulacních nádrží, které jsou často nezajištěné před vletem hmyzu či spadem prachu a dalšího partikulovatelného materiálu. Mikrobiologické rozborů v takových případech potvrdily přítomnost indikátorů fekálního znečištění a sníženého stupně dezinfekce stěn, přítomnost indikátorů organického znečištění a dokonce i plísní. V odebraných vzorcích jsou nacházeny nejčastěji tyto látky (část polutantů zachycena na Obrázku 11):

- Konidie a hyfy mikromycet, např. plísní, kvasinek.
- Škrob
- Větší částice, např. pylová zrna, motýlí šupiny, ptáčí peří, štětiny máloštětinatců
- Rostlinné a živočišné zbytky a schránky
- Trichomy rostlin
- Zbytky chitinu hmyzu
- Detritus s rozvíjejícími se vlákny bakterií. [28]

Tyto mikroorganismy a částice se významně podílí na degradaci jakosti akumulované pitné vody tím, že jsou škodlivé, případně jsou substrátem pro další troficky závislé mikroorganismy. Cestou vzdušné kontaminace dochází k tvorbě biofilmů, které bývají často velmi podceňovaným zdrojem organického substrátu. Ideální podmínky pro záchyt

mikromycet (plísní) a pro rozvoj jiných kontaminantů jsou v místech kulminace hladin na smáčených stěnách nádrží. Biologické ukazatele dále ovlivňují hygienickou nezávadnost dodávané pitné vody, její organoleptické vlastnosti a korozní agresivitu. [24]



Obrázek 11 - Nejčastější kontaminanty vodárenských zařízení [24]

- a) Hyfy mikromycety b) Pylové zrno c) Komidie mikromycety
d) Zbytek hmyzího těla s vlákny bakterií a hyf mikromycet

Pro včasné odhalení kontaminace objektů by měly být pravidelně prováděny biologické audity jednotlivých zařízení, které umožňují vytipovat rizika vedoucí ke zhoršení jakosti distribuované nebo vyráběné pitné vody.

Mírou odolnosti pitné vody proti rozvoji mikroorganismů a tvorbě biofilmů (nárostů) při její akumulaci a distribuci, v podmínkách absence dezinfekčního prostředku, je označována jako biologická stabilita pitné vody. Biologická stabilita je jedním ze základních požadavků při dopravě a akumulaci pitné vody. [24]

2.4.3 Požadavky na návrh filtrů a způsob odvětrání

Požadavky na návrh filtrů jsou definovány normou ČSN 75 5355 Vodojemy. Aplikace filtrů v těchto objektech je specifická vysokými požadavky na funkčnost a prodyšnost filtrů. Vzhledem k proměnlivé výšce vodní hladiny je nutné zajistit jak odvětrávání objektů, tak jejich zavzdušňování.

Dle normy musí být každá nádrž vodojemu vybavena větracím zařízením. Všechny součásti větracího zařízení musí být nainstalovány nad úrovní nejvyšší hladiny v nádrži a spojovací potrubí by mělo být do prostoru nádrže vedeno přes manipulační komoru nebo přes samostatnou vstupní komoru (není-li manipulační komora přiřazena k nádrži). V průchodu manipulační nebo vstupní komorou musí být do potrubí větracího zařízení osazeno filtrační zařízení spolu s prachovým filtrem, které by mělo být umístěné tak, aby filtrační vložky byly snadno vyměnitelné. Umístění tohoto filtračního zařízení nebo i jen přístupu k němu na vnější stranu objektu je nepřípustné. Zároveň je nutné vzduchotechnické potrubí odvodnit. Zachycený kondenzát musí být spolehlivě odveden mimo nádrže vodojemu. Vnější vyústění větracího průduchu se doporučuje opatřit pevnou protidešťovou (protisněhovou) žaluzií a filtrační vložkou zamezující průnik větších částic (např. pylu), drobných organismů a částic zvířeného a vláknitého prachu (odpovídá prvnímu stupni filtrace u ventilačních systémů). Filtrační vložka by měla být volena z materiálu, který je účinný v rozsahu teplot alespoň -20 °C až $+30\text{ °C}$. V odůvodněných případech (např. v blízkosti průmyslových aglomerací, větší dopravní zátěže, apod.), kde je možnost zvýšeného přísunu částic vzduchem do objektu vodojemu, lze přistoupit i k přísnějšímu omezení vstupujícího větracího vzduchu a větrací průduch opatřit další filtrační bariérou, další vrstvou ochranného filtračního materiálu (např. zdvojená sorpční vložka s náplní aktivního uhlí zachycující pachy).

Vzduchový výkon pasivního větracího zařízení vodojemu, osazeného prachovými filtry, má být navržen na nejméně jeden a půl násobek maximálního hodinového odběrového množství vody při maximální povolené tlakové ztrátě znečištěného filtračního materiálu nebo na maximální odtok při havárii odběrného potrubí podle toho, která hodnota bude větší.

Všechny prostory manipulačních komor vodojemů musí být odvětrány průduchy opatřenými proti vnikání deště (sněhu), nežádoucích částic nebo předmětů a organismů a nepovolaných osob. Doporučuje se použití protidešťové žaluzie nebo větrací nastavitelné

mřížky opatřené hustou sítí pletiva nebo textilie (popř. tkaniny) bránících vletu hmyzu, drobných organismů a jiných částic bez ohledu na skutečnost zda jsou schopny vlastního pohybu nebo mohou být unášeny termickým prouděním vzduchu nebo větrem. V případě, že jsou vstupní dveře do prostoru akumulací nádrže navrženy nad úrovní hladiny vody v nádrži, doporučuje se navrzení nuceného větrání manipulační a vstupní komory alespoň po dobu otevření těchto spojovacích dveří do prostoru akumulací nádrže s cílem zajištění jednosměrného proudění vzduchu, omezujícího možnost kontaminace akumulací nádrže. Aktivní větrací zařízení (automaticky uváděné do chodu nejlépe již v případě otevření prvních vstupních dveří do objektu) by mělo odvádět vzduch z prostoru akumulací nádrže přes manipulační komoru tak, aby byl zajištěn ve vstupní nebo manipulační komoře trvalý podtlak proti prostoru akumulací nádrže i v případě otevřených spojovacích dveří. [8]

Vhodné filtrační zařízení, se skládá ze šesti filtračních segmentů (bariér). Vnější část filtračního zařízení musí být osazena ochrannou mřížkou se sítí, která zachycuje větší částice a hmyz a slouží jako hrubý předfiltr. Uprostřed by měla být umístěna vlastní filtrační vložka, skládající se ze čtyř filtračních vrstev. Tato filtrační vložka by měla být sestrojena tak, aby byla samostatně vyměnitelná. Ve filtrační vložce mají být umístěny následující filtrační vrstvy, a to nejlépe v následujícím pořadí:

- Rounová (netkaná) textilie typu 63/15, plošná hmotnost je 150 g/m^2 , tloušťka 2,5 mm a filtrační průřez 144 μm - zachycuje jemný zvířený a vláknitý prach, částice.
- Protipylová zábrana.
- Rounová (netkaná) textilie sycená aktivním uhlím pro eliminaci plísní a pachů.
- Rounová (netkaná) textilie typu 63/15, plošná hmotnost je 150 g/m^2 , tloušťka 2,5 mm a filtrační průřez 144 μm .

Vnitřní část filtračního zařízení by měla být rovněž zajištěna ochrannou mřížkou se sítí, sloužící jako hrubý filtr. Takovým uspořádáním filtračních vrstev je minimalizována míra vzdušné kontaminace akumulací nádrže, zároveň se tím omezuje možnost náhodného poškození filtračních vložek a maximálně prodlužuje životnost filtračních materiálů. [28]

2.4.4 Kapacita filtračních náplní

Dle normy ČSN 75 5355 Vodojemy je vhodné osadit vzduchové filtry do ventilačních systémů akumulčních nádrží pitné vody. Tyto filtry zabraňují vniku kontaminujících látek do prostoru vodojemu, přičemž polutanty jsou zachyceny na povrchu filtrů. Pokud se filtr v určitém časovém intervalu nemění za nový, místo ochrany zařízení se z něj stává hrozba. Na povrchu filtru dochází k pomnožení částic a bakterií a v případě narušení struktury filtru jsou tyto částice unášeny do vnitřního prostředí akumulace.

Interval výměny filtrů je ovlivňován různými faktory, především se jedná o exponovanost zvoleného místa, druh filtrační náplně, provozní cykly, atd. J. Říhová Ambrožová a kol. ve svém článku doporučuje četnost výměny filtrů odvodit od jejich kontaminace plísněmi s upozorněním na potřebu individuálního řešení pro každý objekt. [25]

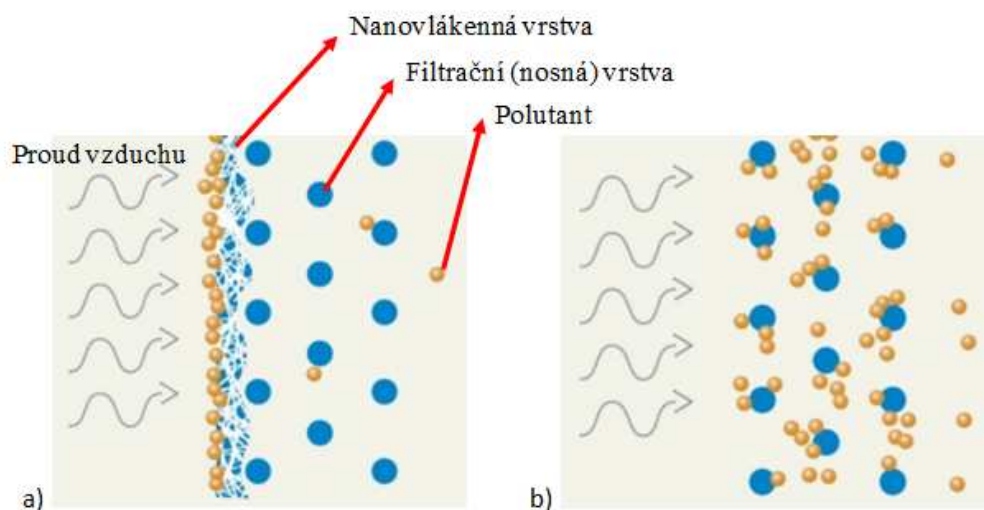
Tabulka 4 - Doporučená četnost výměny filtrů

Počet KTJ plísní na 100 cm ² filtru	Stupeň abund.	Průměr vláken v nm	Charakter kontaminace	Pokyny pro provozní obsluhu
< 100	1	50 - 500	Velmi nízká	Možné prodloužení provozu filtru o 3 roky
100 - 999	2	2 – 100	Nízká	Možné prodloužení provozu filtru o 2 roky
1000 – 9 999	3	100	Střední	Možné prodloužení provozu filtru o 1 rok
10 000 – 99 999	4	50 – 500	Vysoká	Doporučena výměna filtru
≥ 100 000	5	7 – 100	Velmi vysoká	Nutná výměna filtru

2.4.5 Vlastnosti nanomateriálů užívaných pro vzdušné filtry

Hlavní výhodou filtrů z materiálů s nanovláknem je vysoká účinnost při filtraci vzduchu. Nanovláknem jsou vhodná pro filtraci díky svým vlastnostem, kdy při malém průměru vláken se v tkanině nachází velké množství drobných pórů. [1]

Jednotlivé póry tak mají sice malé rozměry, ale zároveň velký celkový objem. Dokáží tedy zachytit velké množství kontaminantů při nízkém ovlivnění průtoku vzduchu. Mezi zachycované kontaminanty patří jemné částice nebo bakterie. [41] Zároveň dochází k úspoře při spotřebě energie a snížení provozních i investičních nákladů. Porovnání působení filtru s nanovláčennou vrstvou a bez nanovláčenné vrstvy je schematicky znázorněno na Obrázku 12. [43]



Obrázek 12 - a) Filtr s nanovláčennou vrstvou b) Filtr bez nanovláč. vrstvy [38]

Hlavními výhodami nanovláčken používaných pro filtraci vzduchu jsou:

- Vysoká efektivita filtrace
- Vysoký měrný povrch
- Vysoká propustnost
- Nízké provozní náklady
- Nízká hmotnost [14] [32]

Toxicita závisí vždy na chemické podstatě látek používaných pro výrobu nanomateriálů nebo v nich obsažených. Pro aplikaci nanovláčenných vzdušných filtrů ve vodárenských zařízeních jsou použity nezávadné polymery, jejichž toxicita je nulová. Nemůže proto dojít k negativnímu ovlivnění okolního prostředí ani média. Všechny nanovláčenné filtry zvolené pro zkoušení měly atest pro použití v prostředí s pitnou vodou. [31]

3. Předmět a cíle dizertační práce

3.1 Předmět dizertační práce

Předmětem dizertační práce je prohloubení znalostí o sekundární kontaminaci vody prostřednictvím vzduchu a o aplikaci nanovláknenných filtrů na vzduchotechnická potrubí vodárenských zařízení.

Zvolený předmět dizertační práce se dotýká odlišných vědních oborů, které se vzájemně prolínají. Není možné jej proto posuzovat individuálně pouze z hlediska vzduchotechniky, případně mikrobiologie, vodárenství nebo praktické aplikace nanovláknenných materiálů. Je nutné k tématu přistupovat komplexně s ohledem na specifika každého ze zmíněných odvětví.

Je paradoxní, že ačkoliv z pohledu každého oboru se jedná o okrajovou záležitost, důsledky nevhodného přístupu k této problematice mohou mít zásadní vliv na ochranu zdraví obyvatel.

Aktuálnost předmětu práce je podložena studii, které se zabývaly tímto tématem (viz Kapitola 2.3), a také zkušenostmi provozovatelů vodárenských zařízení. Navzdory tomu je množství informací k této problematice v současnosti velice omezené.

3.2 Cíle dizertační práce

Cílem dizertační práce je posoudit vhodnost aplikace nanovláknenného filtru na vzduchotechnickém potrubí vodárenských zařízení. Stanovená metodika zkoušení filtru a hypotézy definované v rámci teoretického výzkumu se ověří krátkodobým měřením na experimentálním zařízení. Vhodnost aplikace filtru bude ověřena dlouhodobým zkušebním provozem na vybraném vodárenském zařízení.

Zvládnutí a objasnění zvolené problematiky předpokládá dosažení následujících dílčích cílů:

- Analýza faktorů charakterizujících vlastnosti filtru, definování mechanických i mikrobiologických parametrů.
- Vytvoření metodiky zkoušení filtrů, teoretický návrh postupu zkoušení, definování vymezených podmínek pro zkoušení.

- Návrh a realizace experimentálního zařízení na výzkum filtrů.
- Krátkodobý experiment, ověření metodiky zkoušení filtrů prostřednictvím experimentálního zařízení, ověření části hypotéz.
- Analýza a vyhodnocení výsledků krátkodobého experimentu.
- Dlouhodobý experiment, volba vhodného filtru pro zkoušení v prostředí reálného provozního zařízení, ověření části hypotéz.
- Analýza a vyhodnocení výsledků dlouhodobého experimentu, praktické využití získaných poznatků.

4. Hypotézy a metody řešení

4.1 Hypotézy

V průběhu řešení práce byly definovány hypotézy, vycházející z rešerše odborné literatury a z definovaných cílů dizertační práce, které byly za pomoci hypotéz dále upřesněny. Hypotézy se zaměřují především na vhodnost použití zvoleného nanovláknenného filtru, protože tento materiál nebyl dosud využit v aplikaci pro vodárenství. Prostředkem pro ověření hypotéz bylo krátkodobé a dlouhodobé experimentální zkoušení filtrů.

- Hypotéza 1: Nanovláknenný filtr bude mít díky své struktuře podobný nebo nižší odpor a diferenciální tlak než běžně používané filtry při obdobném průtoku vzduchu.

Zdůvodnění: Tento předpoklad je odvozen od vícevrstvé struktury filtru a vysoké plošné hmotnosti, kdy při malém průměru vláken se v tkanině nachází velké množství drobných pórů o celkovém velkém objemu.

- Hypotéza 2: Se vzrůstajícím průtokem vzduchu přes zkoušený filtr vzroste také počet zachycených mikroorganismů při měření spadů před filtrem.

Zdůvodnění: Předpokládá se, že množství zachycených částic před filtrem je úměrné průtokovému množství vzduchu. Větší množství nasávaného vzduchu by mělo přinášet větší množství kontaminantů.

- Hypotéza 3: Míra mikrobiálního znečištění je výrazně ovlivněna okolním prostředím v místě zkoušení, ročním obdobím a počasím.

Zdůvodnění: Předpokládá se, že bude zaznamenán rozdíl u výsledků zkoušek ve venkovním a vnitřním prostředí, v různých ročních obdobích a teplotách okolního prostředí.

- Hypotéza 4: Přejít mikrobiálního zatížení do povrchové vrstvy vodní masy je možné sledovat i s pomocí krátkodobého experimentálního zkoušení.

Zdůvodnění: Mikrobiální znečištění je unášeno vzduchem a v případě kontaktu s pitnou vodou způsobuje její sekundární kontaminaci, případně zhoršení hygieny prostředí. Navržená metodika krátkodobého zkoušení filtrů se zaměřuje především na srovnání vlastností rozdílných filtrů při aplikaci ve vzduchotechnickém kanále.

Zároveň se však předpokládá, že by měla být vhodná také pro posouzení míry sekundární kontaminace vody.

- Hypotéza 5: Použití nanovláčenného filtru při jeho dlouhodobé aplikaci ve vodojemu zlepší ochranu zařízení před sekundární kontaminací.

Zdůvodnění: Předpokládá se, že použitím nanovláčenného filtru dojde k plnému nahrazení funkce stávajícího běžného filtru. Bude zajištěna ochrana vodojemu, a zároveň bude popsána praktická zkušenost s tímto typem filtrů.

- Hypotéza 6: Při dlouhodobé aplikaci nanovláčenného filtru nedojde k velkému snížení propustnosti filtru anebo k narušení integrity filtru.

Zdůvodnění: Hypotéza vychází z krátkodobých měření provedených v uzavřeném prašném prostředí, kdy docházelo k viditelnému ulpívání částic prachu na povrchu filtru. Toto zanášení přitom mělo při krátkodobém zkoušení jen velmi malý vliv na účinnost filtru a na jeho propustnost.

4.2 Metody řešení

K dosažení cílů bylo použito teoretických, experimentálních krátkodobých i experimentálních dlouhodobých metod řešení. Vzhledem k nutnosti komplexního ověření vlastností nanovláčenných filtrů a jejich účinnosti, nebylo do metod řešení zahrnuto matematické modelování. Tento proces byl nahrazen zařazením experimentálního ověření vlastností prostřednictvím experimentálního zařízení.

Příčinou tohoto přístupu je charakter matematických modelů. Dostupné programy se zaměřují na sledování hmotnostních toků částic v prostoru, případně jiné fyzikální jevy, a opomíjejí specifika mikrobiálního růstu znečištění a jejich vyhodnocení, stejně jako sezónní vlivy, meteorologické jevy a charakter prostředí. Krátkodobá měření na experimentálním zařízení naopak všechny tyto jevy zahrnují a odráží ve výsledcích.

V rámci teoretických metod byla provedena analýza řešené problematiky zaměřená na rešerši stávajícího výzkumu, sestavení metodiky zkoušení a definování vymežujících podmínek pro zkoušky.

Krátkodobý experiment byl proveden prostřednictvím experimentálního zařízení. Jeho cílem bylo ověření vlastností nanovlákných filtrů při porovnání s běžně používanými filtry. Toto zkoušení posloužilo rovněž k ověření části definovaných hypotéz.

Experiment dlouhodobý byl reprezentován aplikací nanovlákných filtrů ve vodárenském provozu, kdy byly ověřeny praktické metody řešení a zbylá část hypotéz.

5. Krátkodobý experiment – příprava realizace

5.1 Charakteristické parametry krátkodobého zkoušení

Filtrační třídy zkoušených filtrů byly definovány již z výroby jednotlivými výrobci prostřednictvím standardních vzduchotechnických postupů. Pro potřeby zkoušení byly proto identifikovány následující charakteristické parametry sloužící k popsání vlastností filtrů a okolního prostředí. U všech testů bylo měřeno:

- Teplota prostředí: parametr byl měřen jako údaj, který charakterizuje vlastnosti venkovního prostředí a aktuální meteorologický stav.
- Změna tlaku před a za filtrem: parametr byl vybrán z toho důvodu, aby bylo možné popsat tlakovou ztrátu zkoušeného filtru. Tlaková diference tak charakterizuje odpor filtru.
- Rychlost proudění: rychlost proudění vzduchu byla měřena ve vybraných bodech tak, aby mohlo být stanoveno průtokové množství vzduchu v profilu.
- Spady ze vzduchu: částice charakterizující úroveň spadu byly zachytávány na Petriho miskách před filtrem, za filtrem a volný spad měřený v blízkosti experimentálního zařízení. Zachycený obsah misek byl následně podroben mikrobiologické analýze a vyhodnocen celkový počet mikroorganismů (CPM_{22}) a počet plísní.
- Výluh z filtračních materiálů: z filtru byly vystříhnuty 4 čtverce, které byly použity pro přípravu výluhu. Následně byla provedena mikrobiologická analýza se zaměřením na celkový počet mikroorganismů (CPM_{22}) a počet mikromycet (plísní).
- Mikrobiologická analýza vody z ofukované vany: byly odebrány vzorky vody před zahájením a po ukončení testu a podrobeny mikrobiologické analýze se zaměřením na celkový počet mikroorganismů (CPM_{22} a CPM_{36}).

Při definování charakteristických parametrů zkoušení bylo uvažováno také využití dalších parametrů, např. měření průtoku, vzdušné vlhkosti, atd. Tyto parametry ale nakonec nebyly zahrnuty do realizovaných měření. Přímé měření průtoku vzduchu by bylo finančně příliš náročné, měření vzdušné vlhkosti nemělo dostatečnou vypovídací hodnotu.

Při výběru charakteristických parametrů mikrobiologické analýzy nebyl vybrán ukazatel počtu mikromycet kvasinek, jejichž výskyt ve vzorcích byl minimální a proto nedostatečně vypovídající. Z hlediska mikrobiologické analýzy obecně platí, že každá životaschopná bakterie nebo spora, která se ocitne na vhodném povrchu, se začne množit, až vytvoří po několika desítkách hodin celou kolonii. [23]

5.2 Popisné charakteristiky výběrových statistických souborů

Popisné charakteristiky statistických souborů byly aplikovány na naměřené hodnoty, které byly zaznamenány v průběhu testu v definovaných časových krocích, čímž vznikl jednorozměrný statistický soubor. Takto naměřená hodnota je obecně označována jako proměnná x_i . Rozpětí statistického souboru je dáno délkou variačního souboru intervalu $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. [17]

Průměr

Průměr je maximálně věrohodným odhadem střední hodnoty. Vyjadřuje typickou hodnotu popisující soubor mnoha hodnot. Jedná se o součet všech hodnot vydělený jejich počtem.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

Medián

Jedná se o prostřední hodnotu v uspořádaném statistickém souboru, tedy prostřední hodnota v pořadí hodnot uspořádaných podle velikosti. Medián je tak 50 % kvantil rozdělující statistický soubor tak, že polovina (50 %) hodnot je menších nebo rovna mediánu a polovina (50 %) hodnot je větších nebo rovna mediánu.

Pro sudý počet prvků souboru se používá Vzorec 14, pro lichý počet prvků Vzorec 15. Výhodou mediánu je, že není ovlivněn extrémními hodnotami. V rámci této práce byl přidán jako popisný (informativní) prvek statistického souboru. [13]

$$\tilde{x} = \frac{1}{2} \left[x_{\frac{n}{2}} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right] \quad (14)$$

$$\tilde{x} = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} \quad (15)$$

Kvartily

V rámci popisu statistického souboru byl vypočten horní (75 %) a dolní (25 %) kvartil. Kvartily rozdělují soubor tak, že 75 % hodnot je menších nebo rovno hodnotě horního kvartilu (resp. 25 % hodnot u dolního kvartilu) a 25 % hodnot je větších nebo rovno hodnotě horního kvartilu (resp. 75 % hodnot u dolního kvartilu).

Statistický soubor je tak prostřednictvím kvartilů a mediánu rozdělen na 4 přibližně stejně četné části. [20]

Rozptyl

Rozptyl bývá také označován jako střední kvadratická odchylka. Charakterizuje variabilitu rozdělení pravděpodobnosti. Je definován jako aritmetický průměr ze čtverců odchylek jednotlivých hodnot od aritmetického průměru, viz Vzorec 16. [13]

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (16)$$

Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka je definovaná jako druhá odmocnina z rozptylu. Vypovídá o míře odlišnosti od průměru v souboru zkoumaných dat.

$$s = \sqrt{s^2} \quad (17)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (18)$$

5.3 Metodika zkoušení

Zkoušení je ovlivněno celou řadou vnějších faktorů, jako je prašnost, teplota, hydrometeorologické jevy, sezónní výskyt kontaminantů. Mimoto příprava zkoušených filtrů a jejich osazení do zkušebního rámečku neprobíhá ve sterilním prostředí. Proto jej nelze zařadit do stejné kategorie jako laboratorní zkoušení účinnosti filtrů předepsané

normou ČSN EN 779, případně měření na měřící trati, které jsou prováděny s minimální tolerancí v laboratorním prostředí s využitím přesných přístrojů (např. laserové počítadlo částic). Přesto dávají výsledky krátkodobého experimentu komplexní náhled na děje související s postupným zanášením filtrů a na míru průchodu mikroorganismů, jejichž výskyt může ohrozit vnitřní prostředí zvolené aplikace.

Cílem krátkodobého zkoušení je především ověření vlastností nanovláknenných filtrů při porovnání s běžnými vzduchovými filtry používanými ve vodárenských aplikacích. Navržená metodika zkoušení má zohledňovat jak popis fyzikálních vlastností filtrů, tak jejich účinnost při záchytu mikroorganismů a plísní. Zároveň má být tato metodika aplikovatelná v podmínkách mimo laboratorní prostředí, popsány mají být také vnější vlivy prostředí působící na měřený filtr. Prostředkem k získání dostatečného množství informací byl návrh a realizace experimentální jednotky, která odpovídá požadavkům definovaným metodikou zkoušení. Zařízení musí umožnit osazení kultivačního média na zachycení mikrobiálního zatížení, a to jak před, tak za filtrem.

V rámci metodiky byly definovány tyto vymežující podmínky zkoušení:

- Zkoušky jsou uskutečněny v prostředí s výskytem cílových kontaminantů.
- Vzduch je nasáván do experimentálního zařízení aktivně prostřednictvím ventilátorů. Jsou měřeny charakteristické veličiny proudění vzduchu. Otáčky motoru ventilátorů jsou regulovatelné.
- Zkoušení srovnávaných filtrů probíhá během jednoho dne. Předpokladem jsou srovnatelné vnější vlivy, v případě venkovního zkoušení stabilní počasí se stálou rychlostí větru.

Zkoušení má simulovat průchod vzduchu měrným profilem, ve kterém je osazen zkoušený filtr. Ačkoliv je toto proudění standardně zajištěno pasivní ventilací, v rámci krátkodobého zkoušení bylo nutné jej zaměnit za proudění vynucené, aktivní. Při zkoušení je nasáván vzduch, který prochází přes zkoušený filtr uchycený v plastovém rámečku. Měří se rychlost proudění vzduchu před filtrem pomocí anemometru a tlaková diference před a za filtrem. Na základě naměřených fyzikálních veličin je určena charakteristická rychlost vzduchu v měrném profilu a vypočítáno průtokové množství vzduchu.

5.3.1 Odběr a analýza vzorků

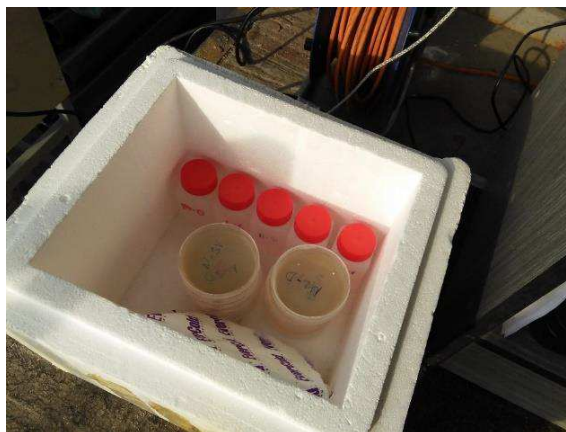
Po každých 20 (respektive 30) minutách byly odebrány tři vzorky spadů ze vzduchu, a to ve filtrační věži před filtrem a za filtrem, a zároveň mimo filtrační věž (tzv. volný spad). Po provedení tří sérií testů byl filtr vyjmut a byly z něj odebrány 4 vzorky. Tyto vzorky byly odeslány k mikrobiologické analýze zkouškou výluhem. Stejný postup se opakoval pro běžný komerční filtr a pro aplikaci bez filtru.

Při každém cyklu měření byly odebírány vzorky spady ze vzduchu, provádí se výluh z filtračních materiálů. U některých cyklů byly odebírány také vzorky vody z ofukované vany.

Analýzu vzorků provedla mikrobiologická laboratoř Agronomické fakulty Mendelovy univerzity v Brně pod vedením Ing. Libora Kalhotky Ph.D.

5.3.2 Spad ze vzduchu

Částice charakterizující úroveň spadu byly zachytávány na sterilních Petriho miskách s kultivačním médiem exponovaných v proudícím vzduchu po dobu 20 minut (resp. 30 minut). Misky byly umístěny vždy ve středu profilu, a to jak před filtrem, tak za filtrem. Misky s živným médiem byly vystaveny přímému proudu vzduchu, nebyly stíněny žádnou konstrukcí ani zařízením. Jako kultivační médium byl použit Plate Count Agar (PCA, Biokar Diagnostics, Francie). Jedná se o přírodní polysacharid s vysokou gelující schopností, který se vyrábí z mořských červených řas. Po expozici byly jednotlivé Petriho misky uloženy v co nejkratší době do chladicího boxu, přepraveny do laboratoře a následně inkubovány dnem vzhůru v termostatu při teplotě 22 °C po dobu 72 hodin.



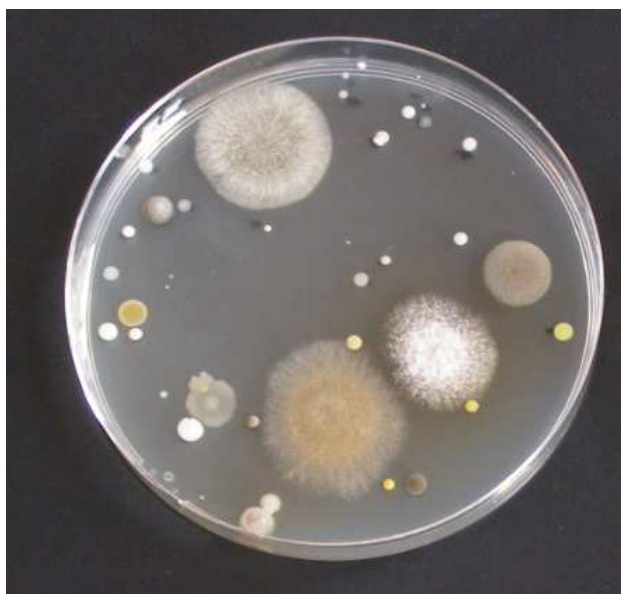
Obrázek 13 - Uložení vzorků do chladicího boxu

Na konci inkubace byly na miskách odečteny narostlé kolonie mikroorganismů a výsledek byl vyjádřen jako KTJ (kolonie tvořící jednotky).

Pro stanovení úrovně kontaminace ze spadu byli zvoleni následující ukazatelé:

- Celkový počet mikroorganismů (CPM₂₂) na kultivačním médiu PCA (Biokar Diagnostics, Francie) při 22 °C za 72 hodin.
- Počet plísní. [18]

Metodika měření vychází z vyhlášky Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb., kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí některých staveb [27] a z ČSN ISO 21527 kterou je definována metodika stanovení počtu kvasinek a plísní. [9]



Obrázek 14 - Ukázka kultivovaného vzorku – ukazatel CPM₂₂

5.3.3 Mikrobiologická analýza výluhu z filtrů

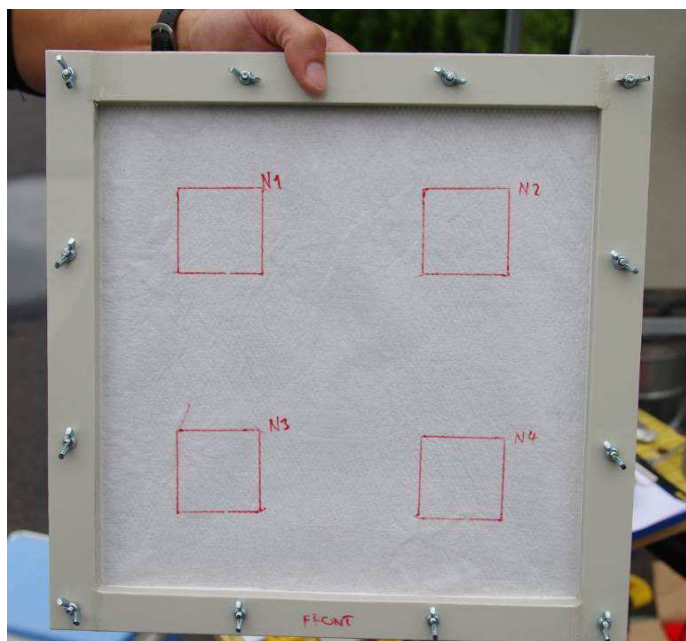
Po ukončení filtrace vzduchu byl filtrační materiál uložen do sterilního obalu. Z filtru byly vystříhány 4 čtverce o ploše 25 cm² (50 x 50 mm), které byly použity pro přípravu výluhu. Každý čtverec byl zvolen tak, aby obsáhl určitou charakteristickou část filtru, rozmístění je patrné na Obrázku 15. Ve střední části filtru se předpokládalo stínění miskou s živným médiem, proto bylo rozmístění vzorků voleno spíše v okrajových částech filtru.

Vzorky filtrů byly spolu s 50 ml sterilního fyziologického roztoku zpracovávány po dobu 120 sekund na homogenizátoru typu STOMACHER. Po zpracování byl do Petriho misek inokulován 1 mililitr roztoku nebo jeho desetinné ředění. Inokulum bylo zalito sterilním živným médiem.

Stanoveny byly tyto ukazatele:

- Celkový počet mikroorganismů (CPM₂₂) na kultivačním médiu PCA (Biokar Diagnostics, Francie) při 22 °C po dobu 72 hodin.
- Počty mikromycet (plísň) na kultivačním médiu Chloramphenicol Glucose Agar (Biokar Diagnostics, Francie) při 25 °C po dobu 120 h.

Po uplynutí doby inkubace byly na miskách odečteny narostlé kolonie a výsledek byl vyjádřen v jednotkách KTJ/ml.



Obrázek 15 - Rozmístění vzorků pro mikrobiologickou analýzu filtru

5.3.4 Mikrobiologické analýzy vody z ofukované vany

V rámci zkoušení se předpokládá ověření přestupu mikrobiálních kontaminantů do vodního prostředí. Z toho důvodu se předpokládá osazení tzv. ofukované vany na výfuku z experimentální jednotky, která bude napuštěna vodou.

Vyčištěná ofukovaná vana se před zahájením testu naplní 5 litry běžné pitné vody. Tato voda je vystavena působení vzduchu procházejícího filtrem po dobu trvání tří cyklů měření, tedy po 3 x 20 minutách trvání testů. Vzorky jsou odebrány před zahájením expozice a po jejím ukončení. Při osazení ventilační věže novým filtrem je vana vypuštěna, vyčištěna a znovu naplněna novými 5 litry běžné pitné vody.

Vzorky jsou odebrány do sterilních vzorkovnic. Objem každého vzorku je 50 mililitrů. Po expozici jsou jednotlivé vzorky uloženy v co nejkratší době do chladicího boxu, přepraveny do laboratoře a následně zpracovány.

Stanoveny jsou tyto ukazatele:

- Celkový počet mikroorganismů (CPM₂₂) na kultivačním médiu PCA (Biokar Diagnostics, Francie) při 22 °C po dobu 72 hodin.
- Celkový počet mikroorganismů (CPM₃₆) na PCA (Biokar Diagnostics, Francie) při 36 °C po dobu 48 hodin.

Pro zpracování byl do Petriho misek inokulován 1 mililitr roztoku nebo jeho desetinné ředění. Inokulum bylo zalito sterilním živným médiem. Po uplynutí doby inkubace jsou na miskách odečteny narostlé kolonie a výsledek byl vyjádřen v jednotkách KTJ/ml.

5.3.5 Způsoby měření fyzikálních veličin

V rámci zkoušení byly mimo mikrobiálních parametrů měřeny také fyzikální veličiny – teplota, diferenciální tlak a rychlost vzduchu. Z naměřených dat byly vypočítány charakteristické hodnoty dílčích měření, které umožnily porovnání vlastností použitých filtrů.

Teplota byla měřena pomocí anemometru, který zároveň měřil rychlost vzduchu a jehož čidlo bylo umístěno uvnitř měrného profilu. Časový krok měření byl 1 sekunda. Z naměřených hodnot byly vypočteny průměry.

Pro vyhodnocení tlaku byl využit diferenciální tlakoměr se sondami umístěnými před a za filtrem uvnitř měrného profilu. Časový krok tlakoměru byl nastaven na 30 sekund. Z naměřených hodnot byly vypočteny průměry.

Pro stanovení rychlosti proudění byl zvolen odlišný postup. Vzhledem k tomu, že rychlost proudění vzduchu nebyla v každém místě příčného profilu stejná, bylo nutné ji měřit

v dílčích částech profilu, a vytvořit tzv. měřicí mřížku. Měření byla prováděna v 9 místech profilu po stanovenou dobu 120 sekund s tím, že hodnoty naměřené v prvních 30 sekundách (tedy v době náběhu ventilátorů) nebyly v průměru zohledněny. V těchto časových intervalech totiž nebyla rychlost proudění ustálená, ale docházelo k postupnému nárůstu měřených hodnot vlivem navýšení otáček ventilátorů. Skutečný interval pro výpočet průměrné bodové rychlosti byl proto 90 sekund, tedy 1,5 minuty. Časový krok měření byl 1 sekunda. Naměřené hodnoty byly zpracovány a popsány statistickou charakteristikou. Metodiku statistického zpracování popisuje Kapitola 2.2.3. Pro další výpočty byla následně použita vypočtená charakteristická průměrná rychlost měření (parametr v_c).

Měření rychlosti v dílčích částech profilu (v měřicí mřížce průtočného profilu) bylo provedeno ještě před samotným zkoušením filtrů, nicméně samotný filtr byl již v zařízení osazen, a to z toho důvodu, aby charakteristická průměrná rychlost plně odpovídala podmínkám v průběhu experimentu. Průměrné bodové rychlosti $v_{b90,i}$ podávají obraz o rozdělení rychlostí vzduchu. Jejich aritmetickým průměrem se vypočítá rychlost v_c charakteristická pro průtočný profil za daných podmínek, viz Vzorec 19. Od takto vypočtené charakteristické rychlosti se jednotlivé bodové rychlosti liší korelačním parametrem k_i , který je specifický pro každé místo profilu. Vzhledem k tomu, že termický anemometr je umístěn při zkušební fázi měření po dobu 20 minut (resp. 30 minut) pouze v jednom místě profilu, je nutné upravit výslednou průměrnou rychlost $v_{b,m}$ zjištěným korelačním parametrem zohledňujícím rozložení rychlostí v daném místě příčného profilu, viz Vzorec 20 a 21.

$$v_{c90} = (v_{b90,1} + v_{b90,2} + \dots + v_{b90,9}) / 9 \quad (19)$$

kde: v_{c90} charakteristická průměrná rychlost profilu

$v_{b90,i}$ průměrná rychlost měřená 90 sekund v bodě profilu i

$$k_i = v_{c90} / v_{b90,i} \quad (20)$$

kde: k_i korelační parametr rozložení rychlostí v bodě profilu i

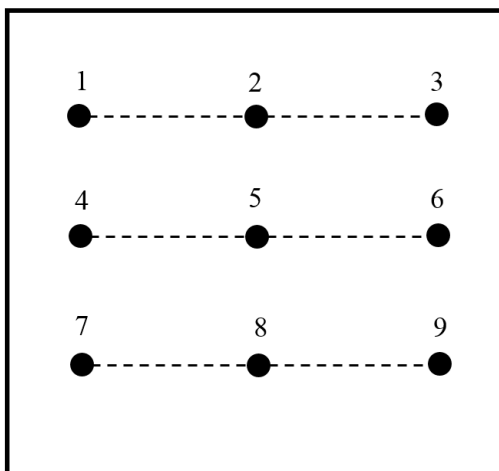
$$v_c = k_i \cdot v_{bT,i} \quad (21)$$

kde: $v_{bT,i}$ průměrná rychlost měřená v čase T (20 či 30 min) v bodě profilu i
 v_c charakteristická průměrná rychlost

Charakteristický (průměrný) průtok vzduchu byl vypočítán z charakteristických průměrných rychlostí naměřených po dobu trvání zkušebního cyklu (20 nebo 30 minut), který byl vynásoben plochou průřezu (v tomto případě se jedná o plochu 400 x 400 mm), viz Vzorec 22.

$$Q_c = v_c \cdot A \quad (22)$$

kde: Q_c charakteristický (průměrný) průtok vzduchu
 A plocha průřezu (zde 0,16 m²)



Obrázek 16 - Měřicí mřížka průtočného profilu

5.4 Experimentální zařízení na výzkum filtrů

Na základě definované metodiky zkoušení bylo navrženo experimentální zařízení pro výzkum filtrů sestávající z ventilátorové filtrační věže používané jak samostatně, tak v kombinaci s „ofukovanou vanou“ (viz Obrázek 17). Návrh zařízení byl konzultován se vzduchotechnickými odborníky i realizační firmou, zohledněny byly také specifické požadavky návrhu s ohledem na snadnou obsluhu a mobilitu zařízení.



Obrázek 17 - Experimentální zařízení pro výzkum filtrů

5.4.1 Ventilátorová filtrační věž

Ventilátorová filtrační věž je zařízení navržené za účelem zkoušení různých druhů filtrů pro filtraci vzduchu a vyhodnocení jejich vlivu na kvalitu prostředí.

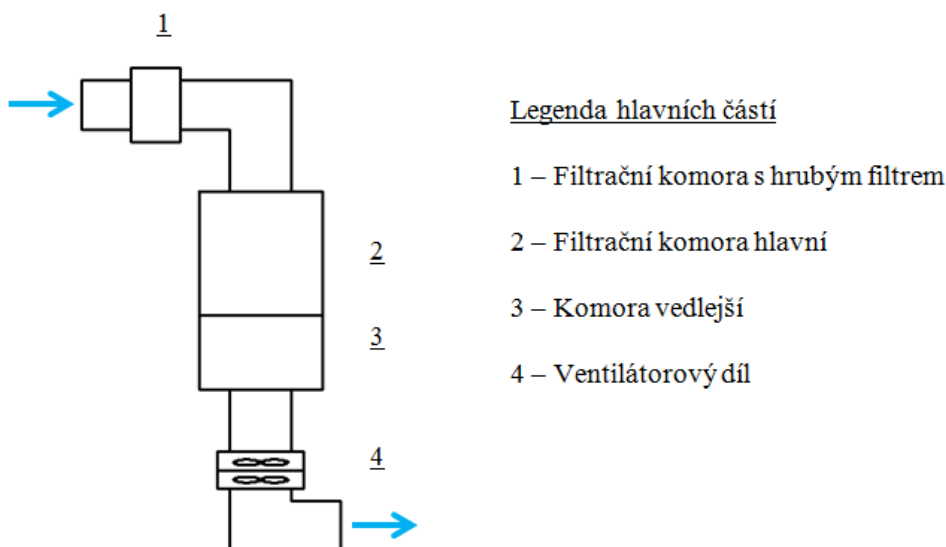
Zařízení bylo navrženo tak, aby bylo možné regulovat otáčky motoru ventilátorů a zároveň umožňovalo kontinuální měření charakteristických veličin proudění vzduchu. Nasávaný vzduch prochází přes zkoušený filtr uchycený v plastovém rámečku rozměrů 400 x 400 mm. Oproti původním předpokladům nebyl na vstupu osazen hrubý filtr, jehož aplikace by mohla zkreslit měření. Výsledné schéma s definovanými funkčními částmi použité pro zadání výroby je zachyceno níže, na Obrázku 18.

Hlavní části ventilátorové filtrační věže:

- Filtrační komora s hrubým filtrem – komora je umístěná na vstupu do zařízení. Hrubý filtr slouží pro zachycení hrubých nečistot. Tento hrubý filtr byl pro potřebu krátkodobého experimentu vyjmut, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků

v důsledku jeho zanášení během krátkodobé expozice. Při dlouhodobější činnosti zařízení by jeho užití bylo opodstatněné.

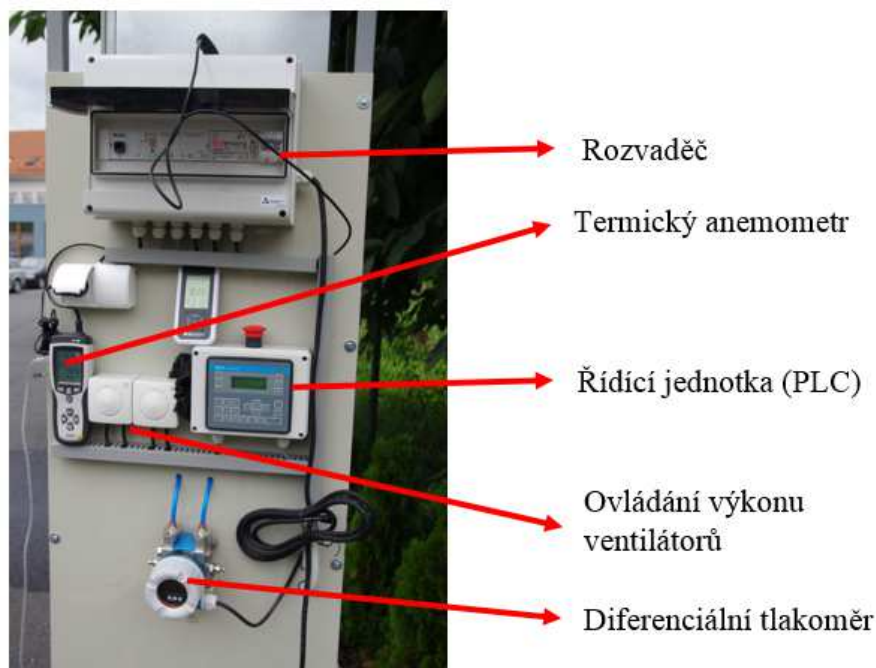
- Filtrační komora hlavní – v komoře je ve vyjímatelném rámu umístěn zkoušený filtr. Pro vnitřní manipulaci jsou na plášti komory umístěna uzavíratelná dvířka. Nad rámem s membránou je osazen držák s miskou na kultivační médium (agar), viz Obrázek 20. V komoře jsou rovněž uchyceny senzor anemometru a tlakoměru. Vnitřní průřez komory je 400 x 400 mm, výška je 600 mm.
- Komora vedlejší – tato komora je vybavena revizními dvířky. Je v ní umístěn držák na misku s agarem. V komoře je zaústěn vývod diferenciálního tlakoměru. Vnitřní průřez komory je 400 x 400 mm, výška je 300 mm.
- Ventilátorový díl – v této části jsou sériově osazeny dva kusy ventilátorů typu RM 315 LK s maximálním výkonem 2 x 800 m³/h při externím tlaku až 800 Pa. Ventilátory jsou ovládané regulátory otáček, které dle potřeby zajišťují změny průtoku vzduchu.
- Rám pro uchycení prvků – rám je osazen pojezdovými kol, která zajišťují mobilitu zařízení.



Obrázek 18 - Ventilátorová filtrační věž – zadávací schéma

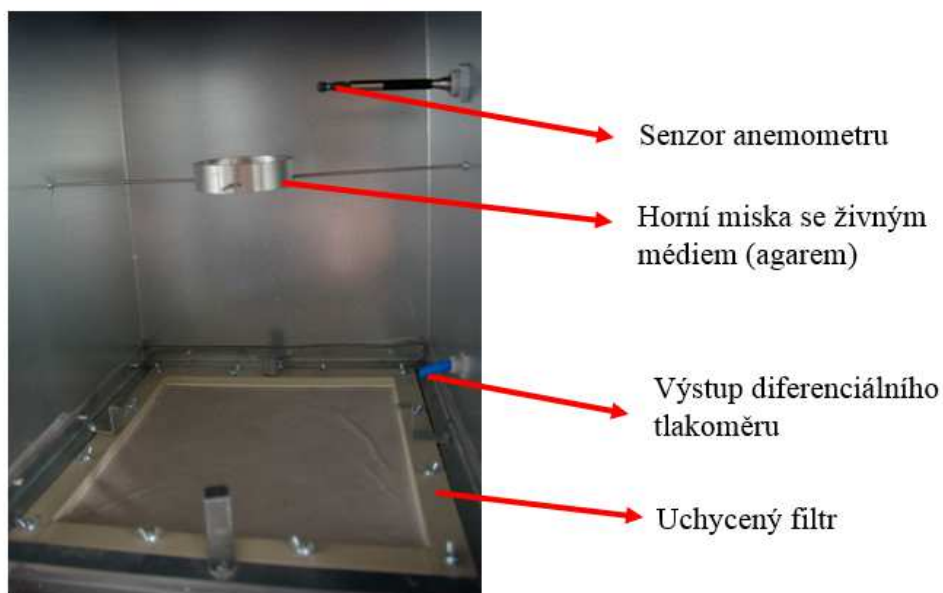
Zařízení je osazeno regulačními a ovládacími prvky, foto čelního panelu viz Obrázek 19. Měřicí přístroje zaznamenávají rychlost proudění vzduchu, teplotu prostředí a změnu tlaku před a za filtrem. Pro měření byly použity tyto přístroje:

- Termický anemometr – měří rychlost proudění a teplotu prostředí dle zvoleného časového kroku. Pro měření byl zvolen anemometr typu TA888 s teleskopickou sondou, ve které je umístěn tenkovrstvý film. Z hlediska přesného měření je nutné anemometr vložit do zóny laminárního proudění, tomu také odpovídá návrh experimentálního zařízení.
 - Rozsah měření rychlosti vzduchu: 0,0 až 10,0 m/s, přesnost +/- 5 %.
 - Rozsah měření teploty: -10 až 50,0 °C, přesnost +/- 1 °C.
- Diferenciální tlakoměr – měří rozdíl tlaku před a za filtrem. Pro měření byl použit přístroj firmy Endress-Hauser, typ Deltabar M PMD55. Jedná se o kompaktní provedení tlakoměru s integrovaným displejem. Měření zajišťuje nerezová membrána na základě získaných vstupních dat.
 - Materiál membrány: nerezová ocel AISI 316 L
 - Rozsah měření: 0,0 – 3000 Pa, přesnost +/- 0,15 %.



Obrázek 19 - Ventilátorová filtrační věž – čelní panel

Čidla měřících přístrojů jsou umístěna v hlavní filtrační komoře spolu s rámečkem, ve kterém je uchycen zkoušený filtr. Dva kusy ventilátorů jsou umístěny v dostatečné vzdálenosti od filtru tak, aby byla zajištěna homogenita vzdušného proudu a zároveň jeho dostatečný tah. V hlavní a vedlejší komoře (tedy před a za filtrem) jsou během zkoušení umístěny misky se vzorky.



Obrázek 20 - Pohled do hlavní filtrační komory

Pro realizaci ventilátorové filtrační věže byly využity standardní vzduchotechnické prvky z pozinkovaných plechů tloušťky 0,6 mm. Komory jsou čtvercové především z důvodu snadnější manipulace se vzorky. Foto realizovaného experimentálního zařízení, viz Obrázek 21.



Obrázek 21 - Ventilátorová filtrační věž - realizace

5.4.2 Ofukovaná vana

Ofukovaná vana je zkušební zařízení, které slouží k ověření předpokladu přechodu polutantů ze vzduchu do vody. Jedná se o plastovou nádobu, na kterou se napojuje výfuk vzduchu z filtrační věže. V nádobě je napuštěna voda, která se prostřednictvím hladiny dostává do styku s filtrovaným vzduchem. Z vody jsou odebírány vzorky a posílány na rozbor.

Zařízení je jednoduché, v přední části je umístěn nápojný kus o DN 320, v zadní části dvířka na výfuk. Horní víko nádoby je otevíratelné, aby byl umožněn jednoduchý přístup k médiu. Rozměry zařízení jsou 1000 x 420 x 550 mm (A x B x H).



Obrázek 22 - Ofukovaná vana - realizace

5.5 Zkoušené filtrační materiály

Pro potřeby krátkodobého zkoušení byly zkoušeny jak filtry nanovláknenné, tak filtry běžné. Oba druhy filtrů byly vždy zkoušeny ve stejný den za stejných podmínek tak, aby byly minimalizované odchylky způsobené vlivem okolních podmínek, např. teploty, vzdušných proudů, volby místa atd.

Filtry byly vkládány do experimentálního zařízení, ve kterém byly upevněné pomocí plastového rámečku, viz Obrázek 23. Uchycení filtrů bylo vždy stejné, v plném rozsahu profilu tak, aby nedocházelo k žádnému zkratovému proudění vzduchu. Rámeček byl vždy umístěn v hlavní filtrační komoře ventilátorové věže.

Každý zkoušený filtr byl v rámečku uložen plošně, nebyl skládán. Důvodem byla zvolená metodika zkoušení filtrů, kdy hlavním cílem bylo srovnání dvou různých filtračních tkanin a nikoliv dosažení limitních účinností. Aby se zamezilo ovlivnění výsledků měření kvůli různému poskládání a tím i nerovnoměrnému zatížení filtru, bylo rozhodnuto o zkoušení filtru jednoduše uchyceném v rámečku bez dalšího skládání nebo jiné změny tvaru.



Obrázek 23 - Příklad upevnění filtru v rámečku

5.5.1 Nanovláknenné filtry

Nanovláknenné materiály, které byly použity pro zkoušení, byly vyrobeny pomocí procesu elektrostatického zvlákňování, kdy roztok polymeru prochází elektrickým polem s vysokým napětím a hotová nanovláknna jsou odebírána do kolektoru, viz kapitola 2.2.3 Elektrostatické zvlákňování. [44]

Vnitřní struktura nanovláknenných filtrů je vícevrstvá. Je to dáno tím, že materiály vzniklé metodou elektrospinningu jsou netkanými textiliemi, kdy jednotlivá nanovláknna jsou uložena náhodně na nosné vrstvě. Parametry jednotlivých vrstev lze měnit při výrobě dle požadavků na finální vlastnosti. Skladba nanovláknenných filtrů je patrná na Obrázku 24, zatímco mikroskopický snímek vrstev nanovláken je zachycen na Obrázku 25. Samotnou aplikaci nanovláknenného filtru uchyceného v rámečku je možné vidět na Obrázku 23.



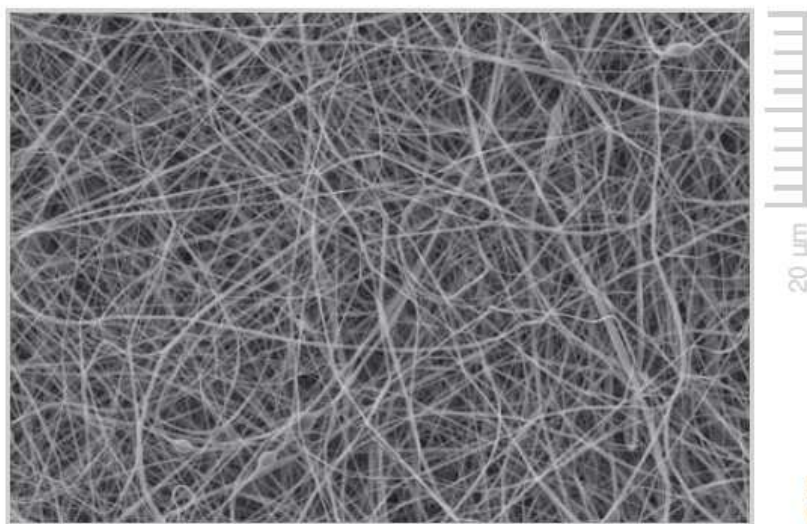
Legenda:

1 – Vrchní krycí vrstva

2 – Vrstva nanovláken

3 – Spodní nosná vrstva

Obrázek 24 - Skladba nanovlákných filtrů



Obrázek 25 - Mikroskopický snímek vrstvy nanovláken

Pokusy byly provedeny postupně na třech různých typech nanovlákných filtrů, charakteristika filtrů je popsána v Tabulce 5. Důležitým kritériem pro jejich výběr byla vysoká míra zachycení mikroorganismů a ostatních biologických polutantů při nízkých plošných hmotnostech aplikované nNT ve filtrační vrstvě. Tyto plošné hmotnosti se pohybují ve zlomcích gramu na metr čtvereční filtrační plochy. Vyšší gramáže nNT sice zvyšují filtrační účinnost, avšak nárůst tlakové ztráty takové filtrační vrstvy je už pro řadu aplikací nepřijatelný.

Z toho důvodu došlo také ke korekci při volbě jednotlivých filtrů. Po prvních zkouškách se ukázalo, že zvolené nanovlákné textilie nejdříve N1 a následně i N2 mají vysoké tlakové ztráty, a to dokonce násobně oproti běžně používanému filtru. Z hlediska zatřídění se

u typu N1 a N2 jedná o třídu HEPA, přesněji H10 platnou pro oba filtry. Proto byl vytipován a zkoušen filtr N3, který spadl do kategorie filtrů jemných, třídy F7, s odlučivostí aerosolových částic E_m v rozsahu 80 - 89,9 % (viz Tabulka 2).

Tabulka 5 - Charakteristika nanovlákněných filtrů

Označení filtru	N1	N2	N3
Označení textilie (výrobce)	PL1023+PL1082 (A)	PL 624+PL626 (A)	PL1067 (A)
Počet vnitřních vrstev textilie	4	4	3
1. vrstva (svrchní)	PP SB (30 g/m ²)	PP SB (30 g/m ²)	PP SB (30 g/m ²)
2. vrstva	nNT PVDF_HFP (0,30 g/m ²)	nNT PU-SAN (0,45 g/m ²)	nNT PU-SAN (0,45 g/m ²)
3. vrstva	nNT PU 918 (0,20 g/m ²)	nNT PU-SAN (0,45g/m ²)	-
4. vrstva (spodní, nosná)	VS SB (30 g/m ²)	VS SB (30 g/m ²)	VS MB (30 g/m ²)
Počet vrstev filtru v rámečku	1	1	1
Celková filtrační plocha	0,16 m ²	0,16 m ²	0,16 m ²
Třída filtru dle ČSN EN 779	H10	H10	F7

Zvolené materiály filtrů byly označeny N1, N2 a N3. Filtry N1 a N2 jsou čtyřvrstvé, kdy účinná filtrační vrstva z nanovlákněných materiálů je dvojitá, vytvořená z kopolymerů polyvinilidenfluoridu a hexafluorpropylenu, respektive z polyuretantového roztoku. Filtr N3 je trojvrstvý, účinná filtrační vrstva je tvořena pouze jednou vrstvou z polyuretanu. Jak je uvedeno výše, hlavním důvodem pro snížení množství účinných vrstev bylo snížení tlakové ztráty filtru a tím i odporu filtru.

Účinné vrstvy jsou shora kryty průdušnou vrstvou z polypropylenu vyráběného pomocí technologie spundbond. Takto vyrobená vrstva netkané textilie zajišťuje odolnost účinné vrstvy filtru proti otěru a mechanickému poškození. [36]

Podobně funguje také spodní vrstva, která má navíc ještě nosnou funkci – jedná se o základovou vrstvu, na níž jsou jednotlivá nanovlákná nanášena při výrobě. Tato vrstva je vyráběna jako netkaná textilie přímo z polymeru. Je tvořena v případě filtrů N1 a N2 viskózou vyráběnou pomocí technologie spundbond. U filtru N3 byla spodní vrstva sice zhotovena také z viskózy, ale vyrobená byla za pomoci technologie meltblown.

Z hlediska aplikace vhodné spodní vrstvy bylo uvažováno nad použitím dvou možností. Zatímco SB textilie připravené z mikrovláken (průměr přibližně 20 μm) vykazují vysokou prodyšnost a téměř zanedbatelný záchyt částic, MB textilie (průměr ca 1 μm) mají při poměrně dobré prodyšnosti výrazně vyšší hodnoty zachytu částic. Tato skutečnost nabádá ke kombinaci MB s nanovláknem, kde přítomnost MB vrstvy nezpůsobí výrazné navýšení tlakové ztráty a přítomnost nNT významně zvýší účinnost zachytu.

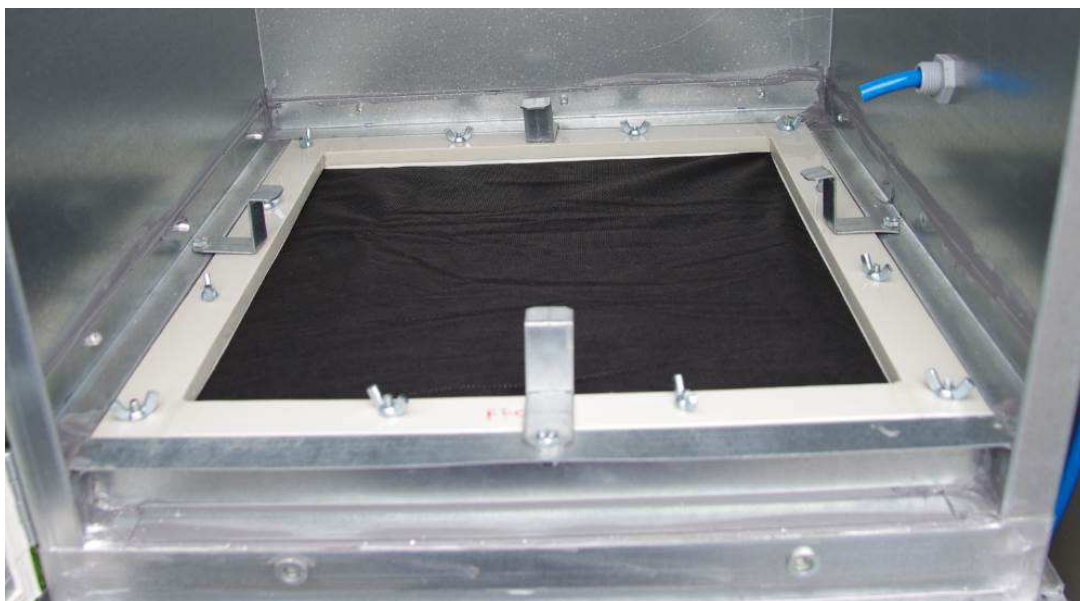
Obecně je u všech nanovláknenných filtrů důležitá stranová preference. Je nezbytné zajistit, aby byly filtry vystaveny proudu vzduchu svou svrchní stranou. V opačném případě bude omezena funkce filtru a snížena jeho účinnost. [35]

5.5.2 Běžně používané filtry

Vzduchotechnická potrubí vodohospodářských zařízení jsou v současné době chráněna běžně používanými filtry (dále jen běžné filtry), které jsou z větší části tvořeny materiálem z netkaných textilií. Filtrační třída těchto filtrů odpovídá zařazení G, tedy hrubé filtry. V současné době neexistuje podrobná rešerše stavu ochrany vodojemů. Ačkoliv je ochrana popsána normou, dle zkušeností získaných od provozovatelů je míra této ochrany individuální. [27] Jako srovnávací ekvivalent byly proto vybrány dva druhy filtrů – filtr běžně používaný (K1) a filtr předepsaný normou (K2).

Po poradě s Provozovatelem vodovodní infrastruktury byla převzata netkaná textilie označená jako filtr K1, jejíž vlastnosti jsou popsány v Tabulce 6. Tato textilie se běžně používá na vzduchotechnických potrubích vodojemů. Jedná se o netkanou textilií z polypropylenu, viz Obrázek 26. Samotná vrstva textilie je příliš prostupná a jemná na to, aby zabránila vnosu menších částic do zařízení. Filtrační třída odpovídá zařazení G1, tedy

hrubý filtr s odlučivostí syntetického prachu nižší než 64,9 %. Vzhledem k nízké účinnosti filtru Provozovatel tuto textilií překládá a znásobením vrstev dosahuje vyššího stupně ochrany. Většina aplikací této textilie zahrnuje uložení ve 4 až 8 vrstvách. Pro zkoušení a srovnání účinnosti byla vybrána varianta 8 vrstev. Navzdory skládání textilie do 8 vrstev filtrační třída filtru K1 odpovídá stále třídě G1.



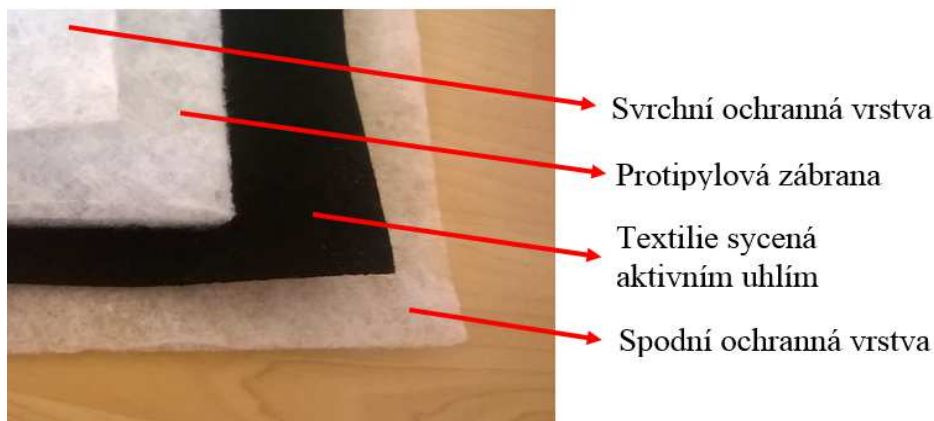
Obrázek 26 - Filtr K1 osazený v rámečku

Na základě požadavků normy ČSN 75 5355 Vodojemny byl zkompletován filtr K2. Tento filtr tvoří:

- Rounová (netkaná) textilie.
- Protipylová zábrana.
- Rounová (netkaná) textilie sycená aktivním uhlím pro eliminaci plísní a pachů.
- Rounová (netkaná) textilie.

Účinné vrstvy filtru K2 jsou kombinací protipylové zábrany a textilie nasycené aktivním uhlím. Obě vrstvy jsou vyrobeny z polymeru PET. Pro předfiltraci slouží svrchní vrstva z hrubé netkané textilie, která je použita také pro spodní část. Použité materiály jsou zobrazeny na Obrázku 27.

Filtr sestavený z výše popsaných částí se řadí do filtrační třídy G3, odpovídající hrubým filtrům. Účinnost filtru odpovídá rozsahu 80 – 89,9 % pro střední odlučivost na syntetický prach.



Obrázek 27 - Vrstvy běžného filtru K2

Tabulka 6 - Charakteristika běžných filtrů

Označení filtru	K1	K2
Označení textilie (výrobce)	PP-textilie (Výrobce B)	Dle ČSN 75 5355 (Výrobce C)
Počet vnitřních vrstev textilie	1	4
1. vrstva (svrchní)	PP (17 g/m ²)	S6305-100 (100 g/m ²)
2. vrstva	-	S4282-150 PET (150 g/m ²)
3. vrstva	-	S4670-270 PET (270 g/m ²)
4. vrstva (spodní, nosná)	-	S6305-100 (100 g/m ²)
Počet vrstev filtru v rámečku	8	1
Celková filtrační plocha	0,16 m ²	0,16 m ²
Třída filtru dle ČSN EN 779	G1	G3

6. Krátkodobý experiment – výsledky a diskuze

V rámci krátkodobého experimentu na experimentálním zařízení byl proveden 1 zkušební test a 6 jednodenních aplikačních testů. Testy byly prováděny s různými filtry nanovláknými i komerčními, ve venkovním i vnitřním prostředí, s rozdílnými dobami expozice, s ofukovanou vanou i bez vany, s rozdílným nastavením regulátorů otáček ventilátorů.

Jednotlivé testy a jejich výsledky jsou popsány v následujících kapitolách. Společným prvkem, který se objevuje u každého testu, byla metodika zkoušení. Vždy byl zkoušen jeden nanovlákný filtr ve více cyklech a jeden filtr komerční ve více cyklech. Na závěr byl proveden test bez osazeného filtru, opět ve více cyklech. Každému měření nového filtru (případně aplikace bez filtru) předcházelo definování charakteristické rychlosti proudění vzduchu.

Vždy stejným způsobem probíhal rovněž odběr vzorků, který je popsán v předchozí kapitole. Vyhodnocení naměřených hodnot probíhalo prostřednictvím statistických metod (viz Kapitola 5.2). Kompletní přehled takto získaných charakteristik je uveden v Příloze 1 této práce.

Základní charakteristika jednotlivých testů, včetně počtu opakování a označení zkoušených filtrů je sumarizována v Tabulce 7.

Tabulka 7 - Základní charakteristika testů

Označení testu	Datum	Označení filtru	Typ prostředí (Uvnitř/Venku)	Počet vrstev filtru v rámečku	Počet opakování měření	Doba expozice [min]	Odvod vzduchu (Vana/Bez vany)
T0	13.05.2014	N1	V	1	3	15;20;30	V
T1	14.08.2014	N1	V	1	3	20	V
		K1	V	8	3	20	V
		-	V	-	3	20	V
T2	28.08.2014	N2	V	1	3	20	B
		K1	V	8	3	20	B
		-	V	-	3	20	B

T3	12.11.2014	N3	V	1	3	20	V
		K2	V	1	3	20	V
		-	V	-	3	20	V
T4	13.11.2014	N3	V	1	3	20	B
		K2	V	1	3	20	B
		-	V	-	3	20	B
T5	03.12.2014	N3	U	1	3	30	B
		K2	U	1	3	30	B
		-	U	-	3	30	B
T6	04.12.2014	N3	U	1	3	30	B
		K2	U	1	3	30	B
		-	U	-	3	30	B

6.1 Zkušební test T0

S ohledem na skutečnost, že byla navržena nová metodika zkoušení, která v sobě kombinovala různé typy měřících postupů a odběrů vzorků, byl před zahájením měření proveden zkušební test T0. Tento test si kladl za cíl zejména:

- Ověřit vhodnost navržené metodiky pro potřeby zkoušení
- Zjistit základní nastavení ventilátorů a měřících zařízení (termický anemometr a diferenciální tlakoměr).
- Ověřit volby časového kroku jednotlivých měření.
- Vytvořit vhodný měřící protokol pro potřeby záznamu jednotlivých měření.
- Zjistit orientační rozsahu měřených hodnot a vypočítaných výsledků.
- Posoudit vhodný typ mikrobiologických parametrů pro jednotlivé typy odběrů.

Zkušební test se zaměřil především na získání základních informací o výsledcích a postupu testů, proto byl testován pouze nanovlákněný filtr N1, který nebyl srovnáván s aplikací běžného filtru nebo aplikací bez filtru.

6.1.1 Výsledky testu T0

Shrnutí: zkušební test T0, proveden 13.5.2014 ve venkovním prostředí, pouze pro filtr N1, 3 x 1 cyklus, doba trvání jednoho cyklu 15 minut (měření M1), 30 minut (M2) a 20 minut (M3), připojena ofukovaná vana, ventilátory nastaveny na maximální otáčky (2 x 100 %), osazen hrubý filtr v místě sání. Výsledné průměrné hodnoty jsou zobrazeny v Tabulce 8.

Průměrná teplota v měrném profilu byla naměřena v rozsahu 16,5 – 16,8 °C (průměrně 16,6 °C). Rychlost byla měřena pouze bodově bez předchozího zjištění korelačního koeficientu k_i . Byly zaznamenány rychlosti proudění 0,242 – 0,252 se směrodatnou odchylkou 0,026 – 0,029 (průměrná hodnota rychlosti 0,247 s průměrnou odchylkou 0,027). Odpor filtru N1 a předřazeného hrubého filtru se proto projevil nízkým průtokem vzduchu v rozsahu 139 - 145 m³/h (průměr 142,0 m³/h) a vysokou tlakovou ztrátou 1180 Pa zaznamenanou shodně ve všech třech měřeních.

V rámci měření spadů ze vzduchu byl během testu T0 měřen pouze parametr CPM₂₂. Byly zjištěny hodnoty před filtrem v rozsahu 11 – 14 KTJ (průměrná hodnota 13,3 KTJ). Tyto hodnoty přibližně odpovídají hodnotám spadu naměřeným mimo měrný profil v blízkosti experimentální jednotky. Velký rozdíl lze pozorovat u naměřených hodnot spadu za filtrem, kde byly zaznamenány výrazně nižší hodnoty v rozsahu 0 – 5 KTJ (průměrně 3 KTJ).

Výluhové testy vykazují velice proměnlivé hodnoty, které se liší u každého ze zkoušených vzorků, a to jak u ukazatele CPM₂₂ (rozsah 12 – 70 KTJ, průměrně 28 KTJ), tak u ukazatele mikromycety-plísňe (rozsah 6 – 13 KTJ, průměrně 9 KTJ). Naproti tomu ukazatel mikromycet-kvasinky byl nulový u všech měření.

Vzorky vody odebrané z ofukované vany ukazují na chybu měření. Při vyhodnocení parametru CPM₂₂ došlo k nadměrnému růstu kultur v miskách. Očekávaný výsledek v řádech jednotek až desítek KTJ tak byl několikanásobně překročen.

Tabulka 8 - Výsledky testu T0

Typ měření		Individuální měření				Průměry		
Označení měření		T0-M1	T0-M2	T0-M3	-	M1-M3		
Označení filtru		N1	N1	N1	-	N1		
Provoz ventilátorů	ks	2	2	2	-	2		
	%	2 x 100	2 x 100	2 x 100	-	2 x 100		
Trvání měření	min	15	30	20	-	15,30,20		
Průměrná teplota	°C	16,5	16,6	16,8	-	16,6		
Průměrná rychlost	m/s	0,252	0,246	0,242	-	0,247		
Směr.odch. průměrné rychlosti	-	0,029	0,026	0,027	-	0,027		
Charakteristická rychlost	m/s	0,252	0,246	0,242	-	0,247		
Charakteristický průtok vzduchu	m ³ /h	145,3	141,6	139,2	-	142,0		
Průměrný diferenciální tlak	Pa	1182	1184	1183	-	1183,0		
Spad	CPM ₂₂	Před filtrem	KTJ	11	14	14	-	13
		Za filtrem	KTJ	4	5	0	-	3
		Mimo filtr	KTJ	14	13	13	-	13
	Plísně	Před filtrem	KTJ	-	-	-	-	-
		Za filtrem	KTJ	-	-	-	-	-
		Mimo filtr	KTJ	-	-	-	-	-
Voda	CPM ₂₂	T=0	KTJ/ml	4760	-	-	-	4760
		T=20	KTJ/ml	4280	4560	4600	-	4480
	CPM ₃₆	T=0	KTJ/ml	1600	-	-	-	1600
		T=20	KTJ/ml	1195	1940	1067	-	1401

Typ měření		Individuální měření				Průměry	
Označení měření		T0-V1	T0-V2	T0-V3	T0-V4	V1-V4	
Označení filtru		N1	N1	N1	N1	N1	
Výluhy	CPM ₂₂	KTJ/ml	70	15	12	16	28
	Plísně	KTJ/ml	13	11	6	7	9
	Kvasinky	KTJ/ml	0	0	0	0	0

6.1.2 Získané poznatky ze zkušebního testu a jejich aplikace

Poznatky získané zkušebními testy byly detailně vyhodnoceny. Obecně se zvolená metodika ukázala být vhodná pro potřeby zkoušení. Některé ze získaných poznatků byly využity pro finální úpravu navržené metodiky:

- Byl sestaven protokol o měření a zavedeno důsledné označení odběrových míst filtrů při výluhových zkouškách. Protokol o měření je uveden v Příloze 3.

- Při měření rychlostí v různých bodech profilu byla naměřena rozdílná průměrná rychlost. Měření tak nebylo dostatečně reprezentativní. Proto bylo bodové měření rychlosti v měrném profilu doplněno o stanovení charakteristické rychlosti platné pro celý profil prostřednictvím měřící mřížky.
- Hrubý filtr osazený na vstupu do experimentální jednotky měl vliv na měřenou rychlost proudění vzduchu. Také se u tohoto filtru očekává jeho postupné zanášení a zkreslování měřených výsledků spadů a výluhů. Z toho důvodu byl filtr vyjmut z jednotky.
- Ukazatel počtu mikromycet-krasinek stanovený u výluhových vzorků byl vyjmut z posuzovaných parametrů. Při opakovaných měřeních v rámci zkušebního testu byla jeho hodnota vždy nulová. Tento parametr byl okrajově ověřen také u pozdějších testů (T1), ale jeho hodnota byla vždy minimální.
- Ukázalo se, že množství zachycených spadů je nutné doplnit o druhý mikrobiologický ukazatel. V dalším zkoušení byl proto doplněn o ukazatel mikromycet-plísni.
- Měření bylo provedeno ve 3 testovacích cyklech při zachování stejného nastavení měření. Výsledky měření jednotlivých cyklů jsou si navzájem velice podobné. Bylo rozhodnuto, že vyhodnocení jednotlivých testů probíhat formou průměrů hodnot z jednotlivých měření.
- Výsledky vzorků spadů jsou uváděny v absolutních hodnotách (KTJ). Vzhledem k ověřené nerovnoměrné distribuci vzduchu by převodem na jednotky vázané na množství vzduchu (KTJ/m^3) nebo na plochu Petriho misky (KTJ/m^2) docházelo ke zkreslení výsledků porovnávaných filtrů.
- Výsledky vzorků z výluhů filtru a z ofukované vany jsou uváděny v jednotkách KTJ/ml vázaných na množství vyhodnocovaného roztoku, který byl získán zpracováním vzorků (u výluhů) nebo odběrem vzorků (ofukovaná vana).
- V průběhu zkoušení dochází k ovlivnění měření různými vnějšími vlivy (vítr, množství částic ve vzduchu). Přitom jejich účinek se v průběhu času mění a není možné zajistit stejné podmínky pro dva různé měřicí cykly ve dvou dnech. Jednotlivá měření různých druhů filtrů mohou být proto srovnávána vždy

s ohledem na specifické podmínky v době jejich zkoušení. Podrobné výsledky jednotlivých testů a měřících cyklů jsou rozepsány v Příloze 2.

- Byly zvoleny doby měření 15, 20 a 30 minut pro test T0. Jednotlivé časy neměly zásadní vliv na výsledky mikrobiologických analýz. Bylo rozhodnuto, že pro venkovní měření bude použita doba zkoušení 20 minut, zatímco pro zkoušení ve vnitřním prostředí doba 30 minut. Zvolené doby odpovídají požadavkům daným vyhláškou Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb i předchozím výzkumům. [24]
- Vzorky odebrané z ofukované vany během zkušebního testu byly kontaminované. Po analýze vykazovaly výsledky řádově v tisících KTJ bez jakékoli závislosti i příčiny. Důvodem bylo použití rozvodu nedostatečně upravené užitkové vody, kterou byla vana naplněna. U dalších měření byla vana plněna vždy pitnou vodou ze standardního vodovodního řadu.
- Vzhledem k předpokladu minimálních naměřených hodnot byla expozice vzorků vody z ofukované vany maximálně prodloužena. Mezi jednotlivými měřícími cykly byla voda ve vaně ponechána, po každém cyklu byly odebrány vzorky. Při každé nové aplikaci byla voda vyměněna a vana umyta.
- Vzhledem k vyššímu odporu nanovláčenného filtru N1 bylo rozhodnuto o provedení testů T1-T4 při plných otáčkách obou ventilátorů. U testů T5 – T6 byly otáčky motoru ventilátorů sníženy tak, aby byly minimalizovány rozdíly v rychlostech mezi jednotlivými cykly měření.
- Nevhodně nastavený diferenciální tlakoměr. Byla nutná korekce měřeného času a jeho převod na čas aktuální. Přístroj byl přenastaven na správné parametry.
- Volba časového kroku u diferenciálního tlakoměru a teploměru – naměřené hodnoty se v průběhu krátkodobého testu měnily jen minimálně, v rozsahu přesností měřících zařízení. Z toho důvodu byl upraven časový krok měření z původní 1 sekundy na 30 sekund.

6.2 Test T1

Shrnutí: test T1, proveden 14.8.2014 ve venkovním prostředí, filtry N1 a K1, 3 x 3 cykly, doba trvání jednoho cyklu vždy 20 minut, připojena ofukovaná vana, ventilátory nastaveny

na maximální otáčky (2 x 100 %). Výsledné průměrné hodnoty jsou zobrazeny v Tabulce 9.

Průměrná teplota v měrném profilu byla naměřena v rozsahu 17,1 – 18,4 °C během jednotlivých měřících cyklů. Při zkoušení běžného filtru a aplikace bez filtru byla teplota vyšší o ca. 0,5 °C.

Charakteristická rychlost proudění byla nižší u filtru N1, kde dosahovala hodnot v rozmezí 0,457 – 0,486 m/s (průměrně 0,473 m/s), zatímco u filtru K1 bylo naměřeno 1,472 - 1,607 m/s (průměrně 1,554 m/s). Maximální rychlosti byly zaznamenány u aplikace bez filtru, a to 2,793 – 3,011 (průměrně 2,903).

Stejnými rozdíly pak je charakterizován také průtok vzduchu filtry dosahující hodnot 263,3 – 280,2 m³/h u filtru N1 (průměr 272,5 m³/h), 847,9 - 925,6 m³/h u filtru K1 (průměr 894,8 m³/h) a 1608,9 – 1734,1 m³/h u aplikace bez filtru (průměr 1671,9 m³/h). Rozdílným hodnotám odpovídají také naměřené hodnoty diferenciálního tlaku, které jasně ukazují na nejvyšší odpor nanovlákněného filtru N1 (průměrně 1180 Pa) oproti běžnému filtru K1 (průměrně 728 Pa) a minimální ztráty v případě aplikace bez filtru (10 Pa).

Průměrný spád před filtrem byl srovnatelný pro oba filtry N1 a K1 i aplikaci bez filtru, který se pohyboval řádově v desítkách KTJ pro oba ukazatele – CMP₂₂ i plísně. O něco málo nižší, ale stále v rozsahu desítek KTJ, byl naměřen také spád mimo experimentální jednotku pro všechny aplikace během 9 měřících cyklů, opět u obou ukazatelů. Oproti tomu rozdíl lze pozorovat u hodnoty průměrného spadu za filtrem. Zde byly zaznamenány výrazně nižší hodnoty u filtru N1 v řádu jednotek (4 – 12 KTJ, průměrně 9 KTJ) oproti filtru K1 (31 – 59 KTJ, průměrně 48 KTJ), a to pro oba ukazatele, CPM₂₂ i plísně.

Výluhové testy vykazují hodnoty v řádu tisíců KTJ pro parametr CPM₂₂ pro oba filtry, přičemž vyšší množství látek je zaznamenáno na filtru K1 (průměrně 10449 KTJ/ml) oproti filtru N1 (průměrně 5034 KTJ/ml). Parametr mikrocety-plísně vykazuje opět hodnoty srovnatelné pro oba filtry, tentokrát s vyšším množstvím látek zachycených na filtru N1 (průměrně 223 KTJ/ml) oproti filtru K1 (průměrně 169 KTJ/ml). Vzhledem k rozsahu jednotlivých měření je možné považovat obě tyto hodnoty za sobě odpovídající.

V testu T1 byl měřen také ukazatel mikromycety-kvasinky. Potvrdil se předpoklad definovaný během zkušebního testu T0. Množství zachycených látek bylo opět minimální, tentokrát v rozsahu 0 – 10 KTJ/ml. Vzhledem k těmto výsledkům nebyl již tento ukazatel měřen v dalších testech.

Podobně jako měření kvasinek měly i výsledky měření vzorků vody z ofukované vany minimální hodnoty v rozsahu 0 – 2 KTJ/ml pro všechny aplikace, a to u obou parametrů CPM₂₂ i CPM₃₆. Naměřené hodnoty nejsou průkazné. Pohybují se na úrovni chyby měření.

Tabulka 9 - Výsledky testu T1 - průměry měření

Typ měření				Průměry měření		
Označení měření				M1-M3	M4-M6	M7-M9
Označení filtru				N1	K1	-
Provoz ventilátorů		ks		2	2	2
		%		2 x 100	2 x 100	2 x 100
Trvání měření		min		3 x 20	3 x 20	3 x 20
Průměrná teplota		°C		17,6	18,2	18,2
Průměrná rychlost		m/s		0,379	1,521	2,829
Směr.odch. průměrné rychlosti		-		0,101	0,212	0,350
Charakteristická rychlost		m/s		0,473	1,554	2,903
Charakteristický průtok vzduchu		m ³ /h		272,5	894,8	1671,9
Průměrný diferenciální tlak		Pa		1181,0	717,7	9,7
Spad	CPM ₂₂	Před filtrem	KTJ	55	58	72
		Za filtrem	KTJ	9	48	-
		Mimo filtr	KTJ	42	30	48
	Plísně	Před filtrem	KTJ	45	49	42
		Za filtrem	KTJ	6	38	-
		Mimo filtr	KTJ	33	22	30
Voda	CPM ₂₂	T=0	KTJ/ml	1	1	0
		T=20	KTJ/ml	0	2	2
	CPM ₃₆	T=0	KTJ/ml	1	1	0
		T=20	KTJ/ml	0	0	0

Typ měření				Průměry měření		
Označení měření				V1-V4	V5-V8	
Označení filtru				N1	K1	-
Výluhy	CPM ₂₂	KTJ/ml		5034	10449	-
	Plísně	KTJ/ml		223	169	-
	Kvasinky	KTJ/ml		2	4	-

6.3 Test T2

Shrnutí: test T2, proveden 28.8.2014 ve venkovním prostředí, filtry N2 a K1, 3 x 3 cykly, doba trvání jednoho cyklu vždy 20 minut, ofukovaná vana nepřipojena, ventilátory nastaveny na maximální otáčky (2 x 100 %). Výsledné průměrné hodnoty jsou zobrazeny v Tabulce 10.

Průměrná teplota v měrném profilu byla naměřena v rozsahu 16,7 – 20,5 °C během jednotlivých měřících cyklů. Při zkoušení běžného filtru a aplikace bez filtru byla teplota vyšší průměrně 1,6 °C.

Na základě měření bylo zjištěno, že charakteristická rychlost proudění byla opět nižší u filtru N2. Dosahovala hodnot v rozmezí 0,485 – 0,548 m/s (průměrně 0,521 m/s), zatímco u filtru K1 byla naměřena rychlost 1,496 – 1,614 m/s (průměrně 1,575 m/s). Maximální rychlosti byly zaznamenány u aplikace bez filtru, a to 2,875 – 2,933 m/s (průměrně 2,911 m/s).

Podobnými rozdíly je charakterizován také průtok vzduchu filtry. Byly naměřeny hodnoty 279,1 – 315,5 m³/h u filtru N1 (průměr 300,3 m³/h), 861,8 - 930,8 m³/h u filtru K1 (průměr 907,3 m³/h) a 1656,1 – 1689,1 m³/h u aplikace bez filtru (průměr 1676,7 m³/h). Rozdílným hodnotám odpovídají také naměřené hodnoty diferenciálního tlaku, které jasně ukazují na nejvyšší odpor nanovláčenného filtru N1 (průměrně 1211 Pa) oproti běžnému filtru K1 (průměrně 737 Pa) a minimální ztráty v případě aplikace bez filtru (13 Pa).

Průměrný spad před filtrem pro parametr CPM₂₂ byl nejmenší pro filtr N2 (18 – 34 KTJ, průměrně 28). O něco málo vyšší hodnoty byly naměřeny u filtru K1 (31 – 43 KTJ, průměrně 36 KTJ), významně vzrostl u aplikace bez filtru (66 – 200 KTJ, průměrně 128 KTJ). Spady měřené mimo experimentální jednotku přitom zůstávají podobné pro všechny 3 aplikace, tedy v rozsahu 11 – 46 KTJ. Velký rozdíl je možné pozorovat v měřeních spadů za filtry, které pro filtr N2 dosahují hodnot v jednotkách KTJ (2-4 KTJ), zatímco pro filtr K1 jsou měřeny hodnoty v desítkách KTJ (23 – 34 KJ).

Obdobná situace je patrná ve výsledcích spadů pro ukazatel plísně. Hodnoty měřené před filtrem jsou si podobné stejně jako hodnoty měřené vedle experimentální jednotky. Rozdílné jsou opět hodnoty měřené za filtrem, které dosahují podobných hodnot, jako u parametru CPM₂₂.

Výluhové testy vykazují hodnoty v řádu stovek KTJ pro parametr CPM₂₂ pro filtr N2 (rozsah 135 – 4280 KTJ/ml, průměr 1284 KTJ/ml), zatímco pro filtr K1 jsou měřeny hodnoty v desítkách KTJ (rozsah 55 – 155 KTJ/ml, průměr 99 KTJ/ml). Obdobně ukazatel mikromycety-plísňe vykazuje hodnoty v řádech tisíců KTJ/ml pro oba filtry, přičemž vyšší množství látek bylo naměřeno na filtru N2 (průměrně 2580 KTJ/ml) při porovnání s filtrem K1 (průměrně 1341 KTJ/ml).

Ofukovaná vana nebyla během testu T2 připojena k experimentálnímu zařízení.

Tabulka 10 - Výsledky testu T2 - průměry měření

Typ měření			Průměry měření			
Označení měření			M1-M3	M4-M6	M7-M9	
Označení filtru			N2	K1	-	
Provoz ventilátorů	ks		2	2	2	
	%		2 x 100	2 x 100	2 x 100	
Trvání měření	min		3 x 20	3 x 20	3 x 20	
Průměrná teplota	°C		17,3	18,9	20,4	
Průměrná rychlost	m/s		0,407	1,575	2,985	
Směr.odch. průměrné rychlosti	-		0,127	0,252	0,374	
Charakteristická rychlost	m/s		0,521	1,575	2,911	
Charakteristický průtok vzduchu	m ³ /h		300,3	907,3	1676,7	
Průměrný diferenciální tlak	Pa		1211,3	737,0	12,7	
Spad	CPM ₂₂	Před filtrem	KTJ	28	36	128
		Za filtrem	KTJ	3	28	-
		Mimo filtr	KTJ	32	18	30
	Plísňe	Před filtrem	KTJ	14	18	19
		Za filtrem	KTJ	2	15	-
		Mimo filtr	KTJ	23	14	19
Voda	CPM ₂₂	T=0	KTJ/ml	-	-	-
		T=20	KTJ/ml	-	-	-
	CPM ₃₆	T=0	KTJ/ml	-	-	-
		T=20	KTJ/ml	-	-	-

Typ měření			Průměry měření		
Označení měření			V1-V4	V5-V8	
Označení filtru			N2	K1	-
Výluhy	CPM ₂₂	KTJ/ml	1284	99	-
	Plísňe	KTJ/ml	2580	1341	-

6.4 Test T3

Shrnutí: test T3, proveden 12.11.2014 ve venkovním prostředí, filtry N3 a K2, 3 x 3 cykly, doba trvání cyklu vždy 20 minut, připojena ofukovaná vana, ventilátory nastaveny na maximální otáčky motoru (2 x 100 %). Výsledné průměrné hodnoty jsou zobrazeny v Tabulce 11.

Průměrná teplota v měrném profilu byla naměřena v rozsahu 12,1 – 14,3 °C během jednotlivých měřících cyklů. Při zkoušení filtru N3 byla teplota nižší o ca. 0,9 °C oproti měřením filtru K2 a aplikace bez filtru.

Charakteristická rychlost proudění byla nižší u filtru N3. Oproti předchozím měřením však byla téměř dvojnásobná. Nabývala hodnot v rozmezí 0,711 – 0,743 m/s (průměrně 0,732 m/s). U filtru K2 byla naměřena charakteristická rychlost v rozsahu 1,834 - 1,871 m/s (průměrně 1,854 m/s). Maximální rychlosti byly zaznamenány u aplikace bez filtru, a to 2,892 – 3,011 (průměrně 2,931). Rychlost převedená na průtok vzduchu měrným profilem dosahovala hodnot 409,4 - 428,0 m³/h u filtru N3 (průměr 421,4 m³/h), 1056,2 - 1077,9 m³/h u filtru K2 (průměr 1067,8 m³/h) a 1665,0 – 1734,4 m³/h u aplikace bez filtru (průměr 1688,4 m³/h).

Těmto hodnotám odpovídají také naměřené hodnoty diferenciálního tlaku, které jasně ukazují na nejvyšší odpor nanovláčenného filtru N3 (průměrně 1184 Pa) oproti běžnému filtru K2 (průměrně 595 Pa) a minimální ztráty v případě aplikace bez filtru (10 Pa).

Hodnoty naměřeného spadu byly tentokrát obdobné u všech 3 aplikací pro oba srovnávací ukazatele CPM₂₂ i plísně. Spady před filtrem N3 byly naměřeny v rozsahu 4 – 10 KTJ pro filtr N1, 19 – 64 KTJ pro filtr K2 a 30 – 75 KTJ pro aplikaci bez filtru. Obdobný případně o něco nižší byl naměřený spad mimo experimentální jednotku. Výsledky spadů měřených za filtrem byly nulové pro filtr N3. U filtru K2 se oproti tomu hodnoty pohybovaly v desítkách KTJ (10 – 26 KTJ).

Výluhové testy vykazují hodnoty v řádu tisíců až desetitisíců KTJ pro parametr CPM₂₂ pro oba filtry, přičemž vyšší množství látek je zachyceno na filtru K2 (průměrně 19091 KTJ/ml) oproti filtru N3 (průměrně 8494 KTJ/ml). Parametr mikromycety-plísně vykazuje opět hodnoty srovnatelné pro oba filtry, tentokrát v řádech tisíců KTJ se srovnatelným množstvím látek zachycených na obou filtrech (průměrně 2210 KTJ/ml pro N3 a 2239 KTJ/ml pro K2).

Výsledky měření vzorků vody z ofukované vany dosahovaly pouze minimálních hodnot v rozsahu jednotek KTJ/ml pro všechny aplikace, a to u obou parametrů CPM₂₂ i CPM₃₆. Naměřené hodnoty nejsou proto dostatečně průkazné, pohybují se na úrovni chyby měření.

Tabulka 11 - Výsledky testu T3 – průměry měření

Typ měření				Průměry měření		
Označení měření				M1-M3	M4-M6	M7-M9
Označení filtru				N3	K2	-
Provoz ventilátorů		ks		2	2	2
		%		2 x 100	2 x 100	2 x 100
Trvání měření		min		3 x 20	3 x 20	3 x 20
Průměrná teplota		°C		12,7	13,6	13,5
Průměrná rychlost		m/s		0,816	2,265	3,363
Směr.odch. průměrné rychlosti		-		0,209	0,173	0,253
Charakteristická rychlost		m/s		0,732	1,854	2,931
Charakteristický průtok vzduchu		m ³ /h		421,4	1067,8	1688,4
Průměrný diferenciální tlak		Pa		1184,0	594,7	10,0
Spad	CPM ₂₂	Před filtrem	KTJ	7	38	65
		Za filtrem	KTJ	0	19	-
		Mimo filtr	KTJ	11	18	13
	Plísňě	Před filtrem	KTJ	5	42	32
		Za filtrem	KTJ	0	18	-
		Mimo filtr	KTJ	7	12	11
Voda	CPM ₂₂	T=0	KTJ/ml	1	1	9
		T=20	KTJ/ml	0	1	18
	CPM ₃₆	T=0	KTJ/ml	1	1	5
		T=20	KTJ/ml	1	3	2

Typ měření				Průměry měření		
Označení měření				V1-V4	V5-V8	
Označení filtru				N3	K2	-
Výluhy	CPM ₂₂		KTJ/ml	8494	19091	-
	Plísňě		KTJ/ml	2210	2239	-

6.5 Test T4

Shrnutí: test T4, proveden 13.11.2014 ve venkovním prostředí, filtry N3 a K2, 3 x 3 cykly, doba trvání jednoho cyklu vždy 20 minut, připojena ofukovaná vana, ventilátory nastaveny na maximální otáčky (2 x 100 %). Výsledné průměrné hodnoty jsou zobrazeny v Tabulce 12. Oproti všem ostatním měřením byl nejprve aplikován filtr K2 a teprve poté filtr N3.

Průměrná teplota v měrném profilu byla naměřena v rozsahu 7,7 – 13,0 °C během jednotlivých měřících cyklů. Při zkoušení filtru K2 byla průměrná teplota nižší o ca. 4,0 °C oproti měřením filtru N3 a aplikaci bez filtru.

Charakteristická rychlost proudění byla nižší u filtru N3. Nabývala hodnot v rozmezí 0,399 – 0,522 m/s (průměrně 0,479 m/s). U filtru K2 byla naměřena charakteristická rychlost v rozsahu 1,643 - 1,720 m/s (průměrně 1,683 m/s). Maximální rychlosti byly zaznamenány u aplikace bez filtru, a to 2,601 – 2,917 (průměrně 2,745). Rychlost převedená na průtok vzduchu měrným profilem dosahovala hodnot 229,8 - 300,8 m³/h u filtru N3 (průměr 275,8 m³/h), 946,5 - 990,7 m³/h u filtru K2 (průměr 969,6 m³/h) a 1498,0 – 1680,1 m³/h u aplikace bez filtru (průměr 1581,2 m³/h).

Těmto hodnotám odpovídají také naměřené hodnoty diferenciálního tlaku, které jasně ukazují na nejvyšší odpor nanovláčenného filtru N3 (průměrně 1205 Pa) oproti běžnému filtru K2 (průměrně 601 Pa) a minimální ztráty v případě aplikace bez filtru (25 Pa).

Hodnoty naměřeného spadu byly rozdílné pro oba srovnávací ukazatele. Zatímco u parametru CPM₂₂ byly naměřeny hodnoty řádově v desítkách KTJ pro všechny aplikace před filtrem (16 – 108 KTJ), u parametru plísně se výsledky pohybovaly v řádu jednotek KTJ (0 – 24 KTJ). Spady naměřené mimo experimentální jednotku tomuto trendu odpovídaly, byť byly zhruba o polovinu nižší. Spady měřené za filtrem N3 byly s výjimkou jednoho případu nulové pro oba parametry. Spady měřené za filtrem K2 dosahovaly hodnot 0 – 20 KTJ pro oba parametry.

Výluhové testy vykazují abnormálně vysoké hodnoty pro filtr K2 u ukazatele CPM₂₂, (průměrně 140779 KTJ/ml) oproti filtru N3 (průměrně 11273 KTJ/ml). U ukazatele plísně je hodnota u filtru N3 nižší zhruba trojnásobně oproti filtru K2 (409 KTJ/ml oproti 1074 KTJ/ml).

Výsledky měření vzorků vody z ofukované vany dosahovaly hodnot v řádech jednotek až po tisíce KTJ/ml pro všechny aplikace. Jednotlivé vzorky byly pravděpodobně kontaminovány, a to u obou parametrů CPM₂₂ i CPM₃₆.

Tabulka 12 - Výsledky testu T4 – průměry měření

Typ měření			Průměry měření			
Označení měření			M1-M3	M4-M6	M7-M9	
Označení filtru			N3	K2	-	
Provoz ventilátorů	ks		2	2	2	
	%		2 x 100	2 x 100	2 x 100	
Trvání měření	min		3 x 20	3 x 20	3 x 20	
Průměrná teplota	°C		12,3	8,4	12,7	
Průměrná rychlost	m/s		0,547	1,917	3,169	
Směr.odch. průměrné rychlosti	-		0,119	0,111	0,249	
Charakteristická rychlost	m/s		0,479	1,683	2,745	
Charakteristický průtok vzduchu	m ³ /h		275,8	969,6	1581,2	
Průměrný diferenciální tlak	Pa		1205,0	600,7	25,0	
Spad	CPM ₂₂	Před filtrem	KTJ	28	42	66
		Za filtrem	KTJ	1	13	-
		Mimo filtr	KTJ	17	18	15
	Plísňě	Před filtrem	KTJ	3	11	8
		Za filtrem	KTJ	0	7	-
		Mimo filtr	KTJ	4	4	9
Voda	CPM ₂₂	T=0	KTJ/ml	112	275	3
		T=20	KTJ/ml	44	1193	269
	CPM ₃₆	T=0	KTJ/ml	9	2	2
		T=20	KTJ/ml	8	2338	117

Typ měření			Průměry měření		
Označení měření			V1-V4	V5-V8	
Označení filtru			N3	K2	-
Výluhy	CPM ₂₂	KTJ/ml	11 273	140 779	-
	Plísňě	KTJ/ml	409	1 074	-

6.6 Test T5

Shrnutí: test T5, proveden 3.12.2014 ve vnitřním prostředí, filtry N3 a K2, 3 x 3 cykly, doba trvání jednoho cyklu vždy 30 minut, ofukovaná vana nepřipojena, ventilátory nastaveny na maximální otáčky u filtru N3 (2 x 100 %), redukované otáčky motorů u filtru K2 (2 x 50 %) a minimální otáčky u aplikace bez filtru (1 x 10 %). Výsledné průměrné hodnoty jsou zobrazeny v Tabulce 13.

Rozdílné nastavení otáček motoru ventilátorů vycházelo z předpokladu vzájemného přiblížení rozdílných průměrných průtoků vzduchu. Otáčky byly nastaveny na maximum pro filtr N3, na minimum pro aplikaci bez filtru a zhruba na polovinu pro filtr K2.

Průměrná teplota v měrném profilu byla stálá v rozsahu 6,4 – 6,7 °C během jednotlivých měřících cyklů.

Charakteristická rychlost proudění byla nejnižší u filtru N3. Nabývala hodnot v rozmezí 0,369 – 0,471 m/s (průměrně 0,415 m/s). U filtru K2 byla naměřena charakteristická rychlost v rozsahu 0,671 – 0,709 m/s (průměrně 0,691 m/s). Maximální rychlosti byly zaznamenány u aplikace bez filtru, a to 0,861 – 0,863 (průměrně 0,862). Rychlost převedená na průtok vzduchu měrným profilem dosahovala hodnot 212,6 – 271,2 m³/h u filtru N3 (průměr 239,0 m³/h), 386,3 – 408,2 m³/h u filtru K2 (průměr 397,8 m³/h) a 495,8 – 497,3 m³/h u aplikace bez filtru (průměr 496,8 m³/h).

Naměřené hodnoty diferenciálního tlaku ukazují na odpor nanovláčenného filtru N3 (průměrně 1211 Pa) oproti běžnému filtru K2 (průměrně 142 Pa) a nulové ztráty v případě aplikace bez filtru (0 Pa).

Hodnoty naměřeného spadu byly podobné pro oba srovnávací ukazatele, pro všechny aplikace i pro všechny měřící cykly. Výsledné hodnoty se pohybovaly v řádech jednotek KTJ v rozmezí 0 – 4 KTJ. Naměřené hodnoty byly potvrzeny při měření před filtrem, za filtrem i mimo experimentální jednotku.

Výluhové testy vykazují abnormálně vysoké hodnoty pro oba filtry u ukazatele CPM₂₂, kde byly naměřeny hodnoty v řádech desítek až tisíců KTJ/ml (rozmezí 26 - 11520 KTJ/ml). U ukazatele plísně byly naměřeny hodnoty v řádu jednotek, opět shodně pro oba filtry (rozmezí 1 – 18 KTJ/ml).

Ofukovaná vana nebyla během testu T5 připojena k experimentálnímu zařízení.

Tabulka 13 - Výsledky testu T5 – průměry měření

Typ měření			Průměry měření			
Označení měření			M1-M3	M4-M6	M7-M9	
Označení filtru			N3	K2	-	
Provoz ventilátorů	ks		2	2	1	
	%		2 x 100	2 x 50	1 x 10	
Trvání měření	min		3 x 30	3 x 30	3 x 30	
Průměrná teplota	°C		6,4	6,5	6,6	
Průměrná rychlost	m/s		0,448	0,691	0,862	
Směr.odch. průměrné rychlosti	-		0,048	0,060	0,053	
Charakteristická rychlost	m/s		0,415	0,691	0,862	
Charakteristický průtok vzduchu	m ³ /h		239,0	397,8	496,8	
Průměrný diferenciální tlak	Pa		1210,7	141,7	0,0	
Spad	CPM ₂₂	Před filtrem	KTJ	2	1	1
		Za filtrem	KTJ	1	1	-
		Mimo filtr	KTJ	3	0	0
	Plísňě	Před filtrem	KTJ	1	1	1
		Za filtrem	KTJ	1	0	-
		Mimo filtr	KTJ	2	0	0

Typ měření			Průměry měření		
Označení měření			V1-V4	V5-V8	
Označení filtru			N3	K2	-
Výluhy	CPM ₂₂	KTJ/ml	1380	3272	-
	Plísňě	KTJ/ml	11	8	-

6.7 Test T6

Shrnutí: test T5, proveden 4.12.2014 ve vnitřním prostředí, filtry N3 a K2, 3 x 3 cykly, doba trvání jednoho cyklu vždy 30 minut, ofukovaná vana nepřipojena, ventilátory nastaveny na maximální otáčky u filtru N3 (2 x 100 %), snížené otáčky u filtru K2 (2 x 50 %) a minimální otáčky motoru u aplikace bez filtru (1 x 10 %). Výsledné průměrné hodnoty jsou zobrazeny v Tabulce 14.

Rozdílné nastavení otáček motoru ventilátorů vycházelo z předpokladu vzájemného přiblížení rozdílných průměrných průtoků vzduchu. Otáčky byly nastaveny na maximum pro filtr N3, na minimum pro aplikaci bez filtru a zhruba na polovinu pro filtr K2.

Průměrná teplota v měrném profilu byla měřena v rozsahu 7,7 – 10,1 °C během jednotlivých měřících cyklů. Při měření filtru N3 byla průměrná teplota o ca. 1 °C nižší než u filtru K2, a o ca. 2 °C nižší než u aplikace bez filtru.

Charakteristická rychlost proudění byla nejnižší u filtru N3. Nabývala hodnot v rozmezí 0,406 – 0,448 m/s (průměrně 0,428 m/s). U filtru K2 byla naměřena charakteristická rychlost v rozsahu 0,571 – 0,592 m/s (průměrně 0,584 m/s). Maximální rychlosti byly zaznamenány u aplikace bez filtru, a to 0,798 – 0,860 (průměrně 0,834). Rychlost převedená na průtok vzduchu měrným profilem dosahovala hodnot 234,0 – 258,3 m³/h u filtru N3 (průměr 246,3 m³/h), 328,7 – 341,2 m³/h u filtru K2 (průměr 336,6 m³/h) a 459,4 – 495,6 m³/h u aplikace bez filtru (průměr 480,3 m³/h).

Naměřené hodnoty diferenciálního tlaku ukazují na nejvyšší odpor u nanovláknenného filtru N3 (průměrně 1192 Pa) oproti běžnému filtru K2 (průměrně 106 Pa) a nulové ztráty v případě aplikace bez filtru (0 Pa).

Hodnoty naměřeného spadu byly podobné pro oba srovnávací ukazatele, pro všechny aplikace i pro všechny měřící cykly. Výsledné hodnoty se pohybovaly v řádech jednotek KTJ v rozmezí 0 – 11 KTJ. Naměřené hodnoty byly potvrzeny při měření před filtrem, za filtrem i mimo experimentální jednotku.

Výluhové testy vykazují abnormálně vysoké hodnoty pro oba filtry u ukazatele CPM₂₂, kde byly naměřeny hodnoty v řádech desítek až tisíců KTJ/ml (rozmezí 15 - 4453 KTJ/ml). U ukazatele plísně byly naměřeny hodnoty v řádu jednotek, opět shodně pro oba filtry (rozmezí 1 – 19 KTJ/ml).

Ofukovaná vana nebyla během testu T6 připojena k experimentálnímu zařízení.

Tabulka 14 - Výsledky testu T6 – průměry měření

Typ měření			Průměry měření			
Označení měření			M1-M3	M4-M6	M7-M9	
Označení filtru			N3	K2	-	
Provoz ventilátorů	ks		2	2	1	
	%		2 x 100	2 x 50	1 x 10	
Trvání měření	min		3 x 30	3 x 30	3 x 30	
Průměrná teplota	°C		8,0	9,0	10,0	
Průměrná rychlost	m/s		0,470	0,627	0,834	
Směr.odch. průměrné rychlosti	-		0,052	0,053	0,058	
Charakteristická rychlost	m/s		0,428	0,584	0,834	
Charakteristický průtok vzduchu	m ³ /h		246,3	336,6	480,3	
Průměrný diferenciální tlak	Pa		1191,7	106,3	0,0	
Spad	CPM ₂₂	Před filtrem	KTJ	7	6	8
		Za filtrem	KTJ	1	1	-
		Mimo filtr	KTJ	3	8	7
	Plísně	Před filtrem	KTJ	4	2	5
		Za filtrem	KTJ	1	0	-
		Mimo filtr	KTJ	2	6	5

Typ měření			Průměry měření		
Označení měření			V1-V4	V5-V8	
Označení filtru			N3	K2	-
Výluhy	CPM ₂₂	KTJ/ml	2056	2051	-
	Plísně	KTJ/ml	4	11	-

6.8 Souhrnná diskuze nad výsledky testů

V rámci krátkodobého zkoušení bylo vyzkoušeno 5 typů filtrů, z toho 3 filtry nanovlákené (N1, N2 a N3), dále filtr běžně používaný ve vodárenských zařízeních (K1) a filtr předepsaný normou pro vodojemy (K2).

Prováděné testy přinesly celou řadu poznatků. Vzhledem k diverzitě testů, kdy byly měněné jak vstupní podmínky, tak samotné filtry, a vzhledem k rozsahu zpracovávaných údajů, je diskuze rozdělena do dílčích celků zaměřených na jednotlivé zájmové oblasti.

Tyto celky budou popsány pro všechny provedené testy T1 až T6. Souhrnné tabulky výsledků a naměřených hodnot dílčích parametrů jsou uvedeny v Příloze 2.

Výsledky zkušebního testu T0 nejsou v diskuzi záměrně uváděny, protože byl vyhodnocen již v rámci zahájení krátkodobého experimentu a jeho účelem nebylo dosažení vypovídajících výsledků, ale ověření správného nastavení testovacích postupů.

6.8.1 Charakteristika filtrů

Důležitou vlastností charakteristickou pro daný filtr je míra odporu, který je kladen filtrem vůči procházejícímu vzduchu. Z toho důvodu byl u každého filtru vyhodnocen charakteristický průtok vzduchu vycházející z charakteristické rychlosti a průměrný diferenciální tlak. Výsledky jsou zobrazeny na Obrázku 28.

Testy T1 - T4

U testů T1 až T4 byly ventilátory nastaveny na maximální otáčky motoru ventilátorů pro všechny měřicí cykly. Z výsledných hodnot je patrné, že u všech nanovlákných filtrů byl naměřen podobný průměrný diferenciální tlak v rozsahu od 1181 Pa (měřicí cyklus T1-M2, filtr N1) až do 1213 Pa (T2-M2, filtr N2). Průměrná hodnota diferenciálního tlaku se pohybovala vždy okolo hodnoty 1200 Pa. Z tohoto hlediska nebyl pozorován velký rozdíl mezi zkoušenými filtry N1, N2 a N3. Oproti tomu u filtrů běžných byly naměřené hodnoty diferenciálního tlaku rozdílné. Pro filtr K1 se pohybovaly v rozsahu od 715 Pa (T1-M2) do 739 Pa (T2-M3). Pro filtr K2 pak v rozsahu od 594 Pa (T3-M3) do 604 Pa (T4-M1), který tak měl nejmenší naměřenou hodnotu diferenciálního tlaku ze všech zkoušených filtrů při plných otáčkách obou ventilátorů.

Měřeními diferenciálního tlaku u aplikací bez filtrů byly zjištěny hodnoty v rozsahu od 10 Pa (naměřeno v 5 měřících cyklech) do 26 Pa (T4-M3). S výjimkou měření během testu T4 dosahovaly tato měření vždy průměrné hodnoty 10 Pa, kterou tak můžeme považovat za ztrátu způsobenou experimentálním zařízením.

Rozdíl mezi naměřenými hodnotami diferenciálního tlaku a charakteristických průtoků vzduchu při testu T4 je velký. Při porovnání s testem T3 byly zjištěny hodnoty o 5 - 20 Pa (resp. 30 - 200 m³/h) vyšší, přitom byly testovány stejné filtry, a také nastavení ventilátorů bylo shodné. Tento rozdíl mohl být způsoben meteorologickými vlivy, zejména poryvy

větru působícími na sání experimentální jednotky. Vzhledem k tomu, že se tato odchylka objevila u všech měřících cyklů, a také při měření oběma přístroji, nemůže se jednat o nevhodně osazený filtr nebo chybu měřících přístrojů. Naopak to ukazuje na význam vnějších vlivů, které ovlivňují krátkodobý experiment.

U testů T1 až T4 byly stanoveny mezi nanovláčnými filtry nejvyšší hodnoty charakteristických průtoků vzduchu v rozsahu 409,4 – 428,0 m³/h pro filtr N3 při testu T3. Ostatní měření poskytla srovnatelné výsledky filtrů v rozsahu 263,3 – 315,5 m³/h pro filtry N1 (test T1) a N2 (test T2). Obdobných hodnot bylo dosaženo také při testu T4 u filtru N3 (rozsah 229,8 – 300,8 m³/h). Všechny měřící cykly tohoto testu ale byly ovlivněny, proto platí, že vyšší průtok vzduchu byl zaznamenán u filtru N3 než u filtrů N1 a N2. Tento filtr byl proto vybrán pro použití při dalších měřeních T5 a T6.

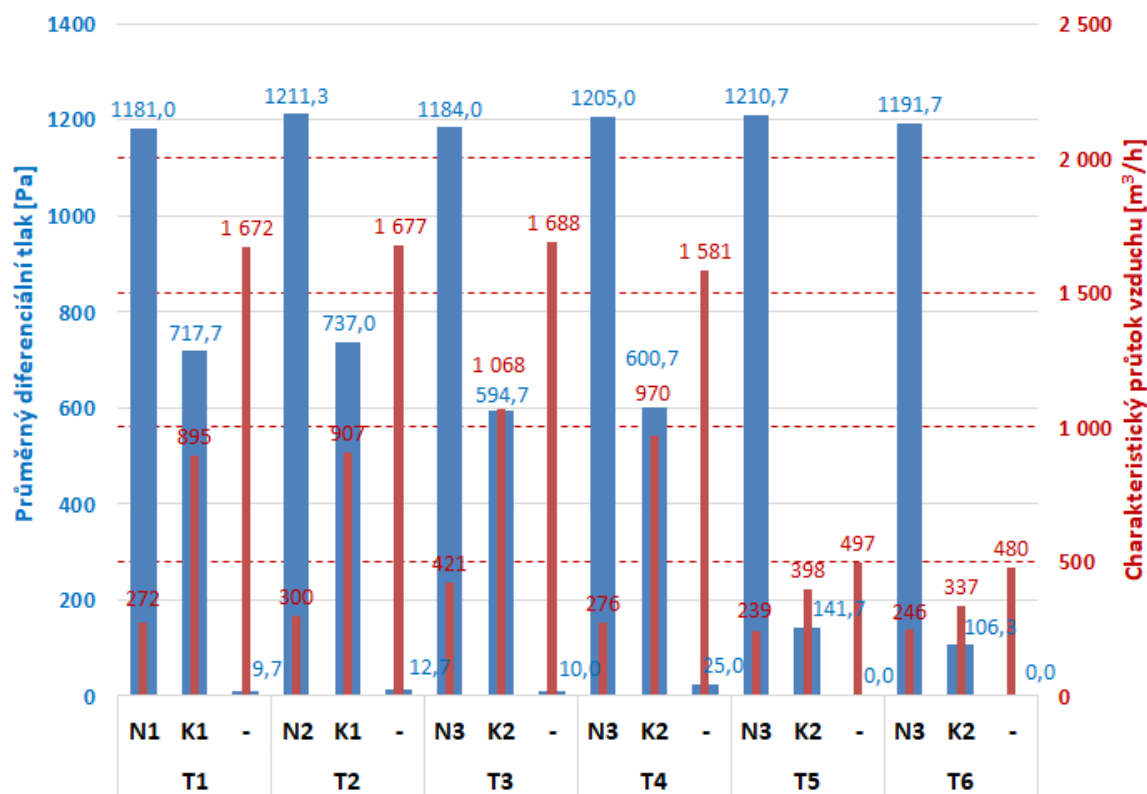
Stanovením charakteristických průtoků u filtru K1 v testech T1 a T2 bylo dosaženo podobných hodnot v rozsahu 847,9 – 930,8 m³/h, které byly nižší než u filtru K2 v testu T3 (1056,2 – 1077,9 m³/h). Na základě této skutečnosti a také z důvodu nižších naměřených hodnot diferenciálního tlaku byl filtr K2 vybrán pro další měření.

Testy T5 – T6

U testů T5 a T6 byla situace odlišná. Zatímco v předchozích případech byl nastaven maximální průtok vzduchu, v těchto testech se měnily otáčky motoru ventilátorů tak, aby bylo dosaženo podobného průtoků vzduchu. Zatímco pro filtr N3 byly ventilátory nastaveny na maximální otáčky, u filtru K2 dosahovaly otáčky 50 % a u aplikace bez filtru otáček ca 5 %. Toto nastavení mělo značný vliv na diferenciální tlak, který u filtru K1 klesl na hodnotu 102 – 143 Pa a u aplikace bez filtru byl nulový ve všech měřeních. Toto snížení potvrzuje, že prodyšnost filtru K2 je vyšší (a naopak odpor filtru K2 je nižší) než u filtru N3.

Charakteristické průtoky vzduchu se naopak snížily u všech měření testů T5 a T6. V tomto případě to bylo ovlivněno především umístěním experimentální jednotky do vnitřního prostředí, kde sice nebyla jednotka zásadně ovlivněna venkovními meteorologickými vlivy, ale došlo ke snížení množství nasávaného vzduchu – toto snížení je patrné u měření filtru N3, kdy došlo k poklesu průtoků o 140 – 210 m³/h. Přestože byly zásadně sníženy

otáčky motoru ventilátorů u filtru K2 i aplikace bez filtrů, naměřené průtoky byly stále vyšší než u filtru N3.



Obrázek 28 - Charakteristika filtrů při testech T1 – T6

Testy T1 – T6

Zatímco hodnoty tlaku byly měřeny přímo diferencíálním tlakoměrem a pouze s minimálními odchylkami, hodnoty charakteristických průtoků vzduchu byly dopočítávány prostřednictvím průměrných rychlostí. Při jejich stanovení bylo využito charakteristiky výběrových statistických souborů, viz Příloha 1. Ke každé průměrné rychlosti tak byla určena také směrodatná odchylka měření a ostatní popisné charakteristiky. Výsledné hodnoty charakteristických průtoků vzduchu je proto důležité interpretovat s vědomím toho, že směrodatné odchylky průměrných rychlostí dosahovaly hodnot v rozsahu 0,036 – 0,219 (průměrně 0,109) pro nanovláčkové filtry, 0,041 – 0,261 (průměrně 0,143) pro běžné filtry a 0,045 – 0,420 (průměrně 0,223) pro aplikace bez filtru.

Bylo vypořádováno, že při měření vyšších hodnot rychlostí narůstá také směrodatná odchylka. Důvodem je především přesnost měřicího přístroje a charakteristika měření.

Při porovnání dosahovaných výsledků mezi filtry nanovláčennými a běžnými je možno konstatovat, že zkoušené filtry nanovláčenné dosahují vyššího diferenciálního tlaku a nižších průtoků. Jejich odpor je tedy vyšší. Nepotvrdila se tak Hypotéza 1, že filtry nanovláčenné budou mít díky své struktuře podobnou nebo vyšší prodyšnost než filtry K1 nebo K2. Filtry N1, N2 i N3 dosahovaly výsledků násobně horších než filtry K1 nebo K2 ve všech měřeních. Hodnotám naměřeným u běžných filtrů se filtry nanovláčenné nedokázaly přiblížit ani při cíleném snížení otáček motoru ventilátorů o 50 %. Naopak u běžných filtrů se díky snížení otáček motorů dosáhlo snížení diferenciálního tlaku na hodnoty násobně nižší, než u filtrů nanovláčenných (120 Pa oproti 1200 Pa).

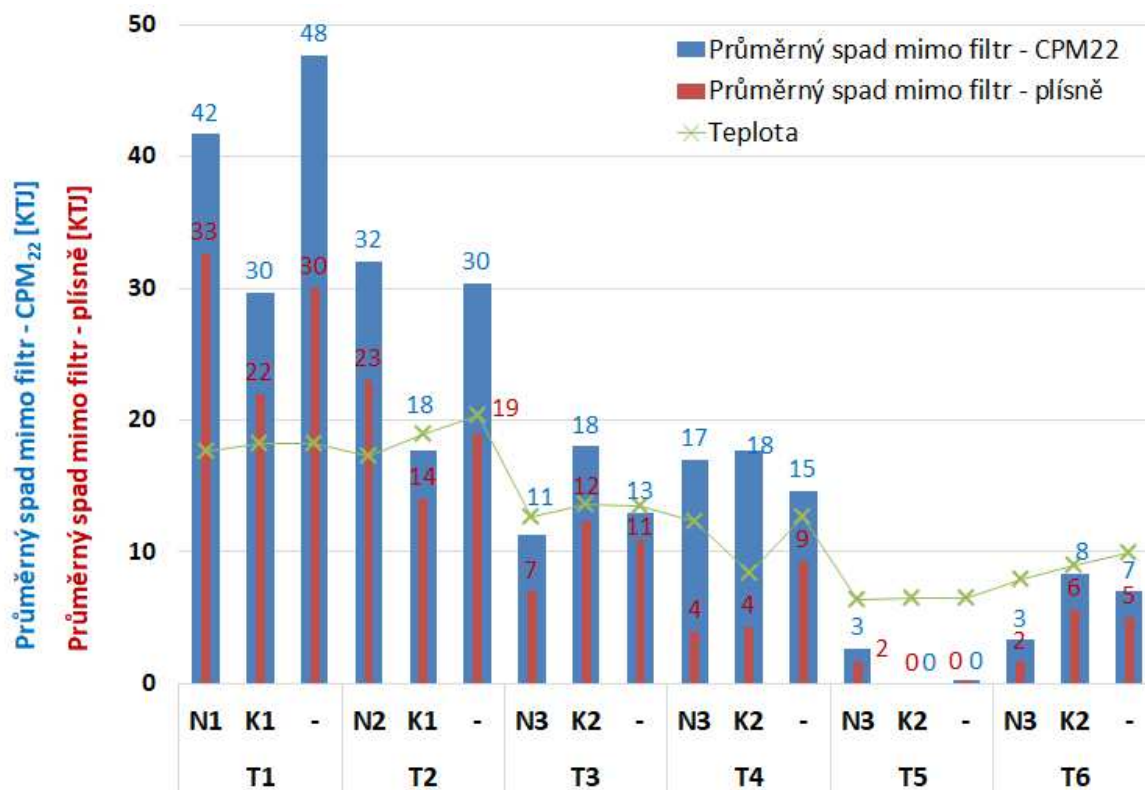
Z hlediska aplikace filtrů ve vodojemech, kde je ventilace pouze pasivní a není zde proto kladen důraz na výkon ventilátorů, je prodyšnost všech druhů filtrů dostatečná. V případě nucené ventilace by bylo nutné jejich vlastnosti dále srovnat a výběr nanovláčenných filtrů dále ověřit.

6.8.2 Vliv prostředí a vnějších vlivů na výsledky testů

Okolní prostředí a vnější vlivy působily výrazné rozdíly v hodnotách naměřených během testu i v rámci mikrobiologické analýzy. V rámci této části diskuze byly zohledněny měření teploty, prostředí testů a hodnoty spadů mimo měrný profil v blízkosti experimentální jednotku.

V grafu (Obrázek 29) jsou zobrazeny průměrné hodnoty spadů pro parametry CPM₂₂ a plísň. Je možné si všimnout trendu, kdy s klesající teplotou a vlivem pozdějšího termínu měření dochází ke snižování naměřených hodnot zachycených mikroorganismů. Testy T1 a T2 byly prováděny ve druhé polovině srpna při teplotách 17 – 20 °C. Úroveň naměřených spadů dosahovala 15 – 59 KTJ pro oba parametry (průměrně 33 KTJ pro CPM₂₂ a 23 KTJ pro plísň), všechna měření byla zaznamenána v desítkách KTJ. Oproti tomu při testech T3 a T4 prováděných v polovině listopadu při průměrných teplotách 12 – 13 °C byla naměřena úroveň spadů v rozsahu 6 – 32 KTJ pro CPM₂₂ (průměrně 15 KTJ) a 1 – 10 KTJ pro plísň (průměrně 8 KTJ). Při testech T5 a T6, které

byly provedeny začátkem prosince ve vnitřním prostředí byly naměřeny nulové hodnoty výskytu mikroorganismů případně jednotky KTJ, a to v rozsahu 0 – 10 KTJ pro oba parametry (průměrně 4 KTJ pro CPM₂₂ a 2 KTJ pro plísně).

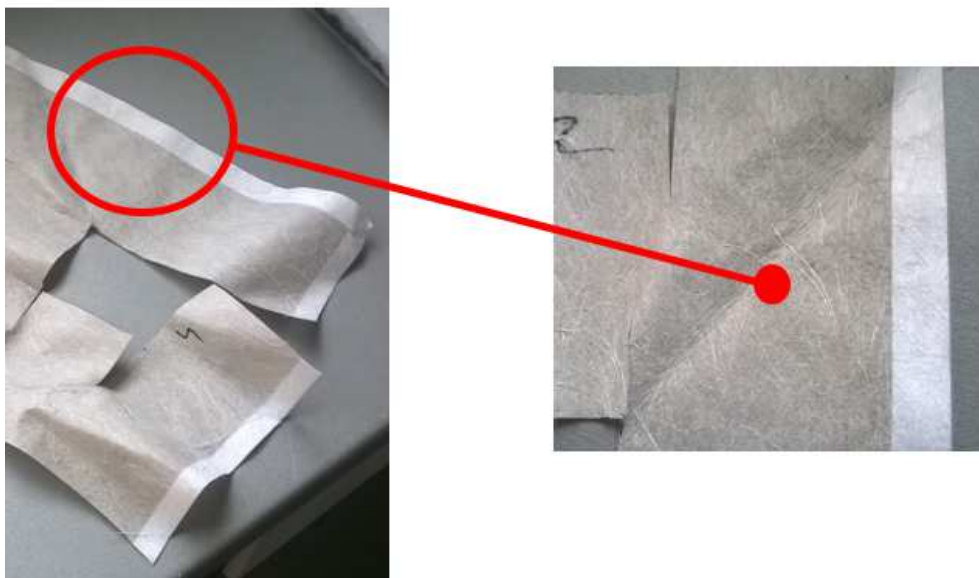


Obrázek 29 - Vliv prostředí a vnějších vlivů na výsledky testů

Mimo vlivu sezónnosti na snížení hodnot spadu bylo pozorováno také ovlivnění měřených hodnot diferenciálního tlaku a průtoků vzduchu při testu T4, kdy při shodném nastavení ventilátorů a měřených filtrů došlo k navýšení diferenciálního tlaku o 5 - 20 Pa a průtoků vzduchu o 30 – 200 m³/h oproti testu T3, a to u všech měřících cyklů, pro všechny aplikace a pro oba měřicí přístroje, viz předchozí kapitola. Předpokládá se, že rozdíl byl způsoben meteorologickými vlivy, zejména poryvy větru působícími na sání experimentální jednotky.

Velký vliv mělo také umístění filtru do vnitřního prostředí skladovacích prostor u testů T5 a T6, kdy byl patrný pokles naměřených hodnot spadů a naopak viditelný nárůst koncentrace prachových částic, které se zachytily na povrchu filtru, viz Obrázek 30. Přitom prodloužení doby trvání testu filtrů z 20 minut na 30 minut nemělo vliv na zvýšení hodnot mikrobiálních ukazatelů.

Na nízký výskyt mikororganismů ve vnitřních prostorách mohla mít vliv také skutečnost, že prostředí skladů je suché (jednorázovým měřením zde byla naměřena vlhkost 26 %) z důvodů temperace vnitřních prostor na teplotu 7 – 10 °C.



Obrázek 30 - Zanesení filtru N3 prachem po ukončení testu T6

Z výsledků tak vyplývá potvrzení Hypotézy 3. Naměřené hodnoty jsou ovlivňovány sezónností i aktuálním počasím a dalšími meteorologickými jevy. Vliv na výsledky testů má také volba prostředí, ať už venkovního nebo vnitřního, které má vliv na měřené hodnoty i mikrobiologickou analýzu. Specifikem vnitřního prostředí byl minimální podíl znečištění mikroorganismy a plísněmi, převládalo zanášení částicemi prachu.

6.8.3 Vyhodnocení spadů

Navržená metodika krátkodobého experimentu byla sestavena tak, aby bylo možné srovnání jednotlivých mikrobiologických analýz z odebraných vzorků. V rámci každého testu byly proto zkoušeny vždy aplikace filtru nanovláčkenného, běžného a aplikace bez filtru při zachování stejných výchozích podmínek měření.

Vyhodnocení naměřených spadů prostřednictvím mikrobiologických analýz vypovídá o tom, jaké množství mikroorganismů prochází filtrem. Vzhledem k minimálním naměřeným hodnotám nebyly do těchto výsledků zařazeny hodnoty zjištěné v testech T5 a T6. Úroveň naměřených spadů před filtrem a mimo experimentální jednotku je ovlivněn

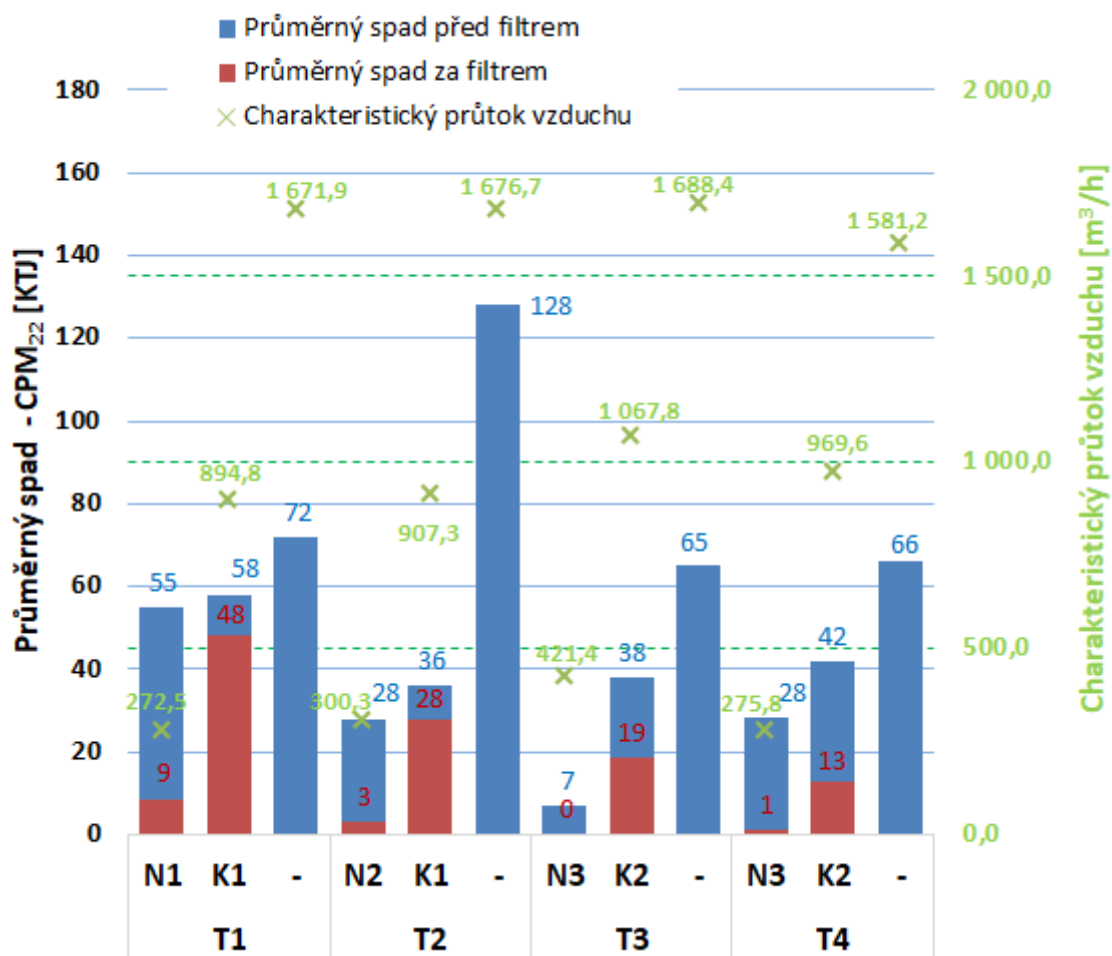
sezónními a meteorologickými jevy, viz předchozí kapitola. Tato část vyhodnocení je proto zaměřena na posouzení rozdílů v množství částic naměřených před filtrem a za filtrem.

Ukazatel CPM₂₂

Při testech T1 až T4 byla naměřena vysoká účinnost nanovláčenných filtrů při zachycení mikroorganismů pro parametr CPM₂₂. Filtrem N1 prošlo 9 – 21 % částic zachycených na misce před filtrem při testu T1, filtrem N2 prošlo 6 -17 % částic při testu T2 a filtrem N3 prošlo 0 % částic (T3) resp. 0 – 7 % částic (T4). V porovnání s těmito hodnotami byly účinnosti filtrů běžných výrazně horší. Filtrem K1 prošlo 75 – 96 % částic (T1) a 74 - 79 % částic (T2). Filtr K2 dosahoval lepších výsledků, kdy bylo za filtrem naměřeno 22 – 86 % částic (T3) a 20 – 50 % částic (T4).

Aplikace bez filtru vykazovala nejvyšší hodnoty u všech prováděných měření, a to na úrovni 110 – 150 % hodnot oproti aplikacím s běžným filtrem, výjimečně až 300 % (test T2).

Výsledky testů T3 a T4 byly ovlivněny poklesem zachycených mikroorganismů pro všechny měřicí cykly a tím i vyšším rizikem chyby měření, nicméně účinnost nanovláčenného filtru je zde jasně patrná. Výsledky jsou sumarizovány níže, viz Obrázek 31.



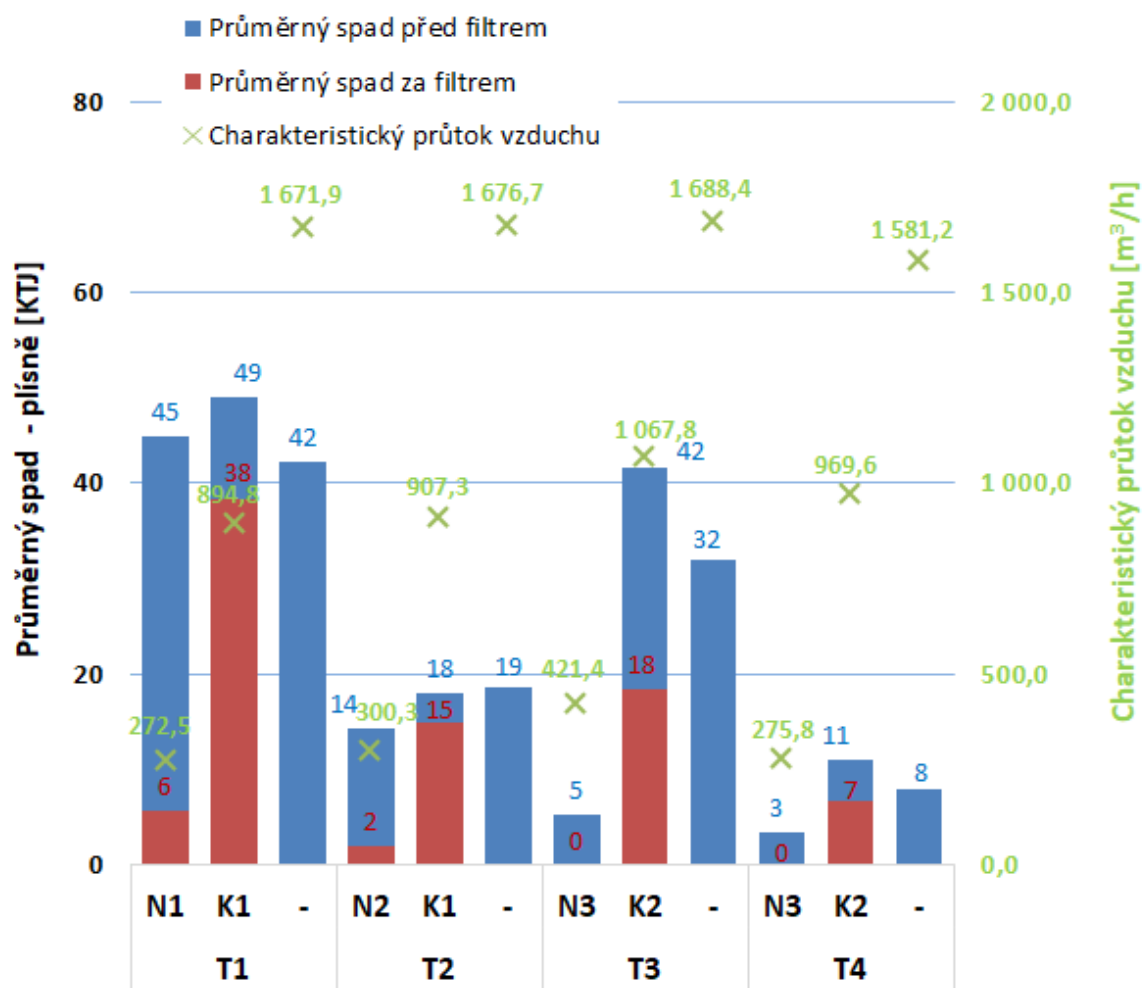
Obrázek 31 - Průměrný spad - CPM₂₂

Ukazatel plísně

Obdobně jako u parametru CPM₂₂ byly stanoveny také hodnoty pro parametr plísně. Při testech T1 až T4 byla naměřena vysoká účinnost nanovláknových filtrů při zachycení částic. Filtrem N1 prošlo 9 – 19 % částic zachycených na misce před filtrem při testu T1, filtrem N2 prošlo 13 - 15 % částic při testu T2 a filtrem N3 prošlo 0 % částic (T3 a T4). V porovnání s těmito hodnotami byly účinnosti filtrů běžných výrazně horší. Filtrem K1 prošlo 66 – 98 % částic (T1) a 64 - 100 % částic (T2). Filtr K2 dosahoval lepších výsledků, kdy bylo za filtrem naměřeno 17 – 76 % částic (T3) a 55 – 67 % částic (T4).

Aplikace bez filtru vykazovala obdobné hodnoty u všech prováděných měření, jako byly hodnoty pro běžné filtry, a to v rozsahu 70 - 100 % oproti hodnotám s aplikací běžného filtru.

Výsledky testů T3 a T4 byly opět ovlivněny poklesem zachycených mikroorganismů pro všechny měřicí cykly, a tím i vyšším rizikem chyby měření, nicméně účinnost nanovláčenného filtru byla opět jasně patrná. Výsledky jsou sumarizovány níže, viz Obrázek 32.



Obrázek 32 - Průměrný spad - plísně

Spady obecně

Při vyhodnocení je nutné brát ohled na skutečnost, že v posuzovaných testech byly otáčky motoru ventilátorů nastaveny na maximum. Vzhledem k různým odporům filtrů přitom měřicím profilem procházelo rozdílné množství vzduchu. Nejmenší průtoky vzduchu byly zaznamenány u filtrů nanovláčenných N1 (test T1, průměr 272,5 m³/h), N2 (T2, 300,3 m³/h) a N3 (T3, 421,4 m³/h a T4, 275,8 m³/h), zatímco filtry běžné dosahovaly

průměrů vyšších – K1 (T1, 894,6 m³/h a T2, 907,3 m³/h) a K2 (T3, 1067,8 m³/h a T4, 969,6 m³/h). U aplikace bez filtru byly naměřeny hodnoty průtoku vzduchu v rozsahu 1498,0 – 1734,4 m³/h.

Hypotéza 2 předpokládá, že se vzrůstajícím průtokem vzduchu vzroste také počet zachycených kontaminantů. Toto tvrzení ovšem nebylo jednoznačně potvrzeno, respektive bylo potvrzeno, ale pouze pro parametr CPM₂₂, kde naměřené hodnoty spadly byly úměrné průtokovému množství vzduchu. U parametru plísně však nebyl podobný trend pozorován, protože zejména hodnoty naměřené u aplikace běžného filtru přesahovaly hodnoty naměřené u aplikace bez filtru, přičemž hodnoty průtoků vzduchu měly zcela opačný trend.

Obecně lze konstatovat, že u nanovlákných filtrů bylo zjištěno nižší množství částic zachycených za filtrem než u filtrů běžných, a to pro oba ukazatele. Rozdíl v účinnosti filtrů je vysoký a odpovídá nálezům dle studie autorů Barhate a kol. [2], a také závěrům studie autorů Sundarajan a kol. [32], která popisuje separaci vzdušných bakteriálních kontaminantů a těkavých organických látek prostřednictvím nanovlákných filtrů.

6.8.4 Vyhodnocení výluhů

Výluhy byly stanoveny ze vzorků odebraných z testovaných filtrů po skončení třetího měřicího cyklu. Z každého filtru byly odebrány vždy 4 vzorky, u kterých byl vyhodnocen ukazatel CPM₂₂ a plísně. U filtrů složených z více vrstev byl odebrán průřez všemi vrstvami textilií a tento komplex byl následně zpracován jako jeden vzorek.

Ukazatel CPM₂₂

Při testech byly naměřeny široké rozsahy hodnot pro různé filtry. Nejnižší hodnoty nanovlákných filtrů byly naměřeny u filtru N2 v rozsahu 135 – 4280 KTJ/ml (test T2, průměrně 1284 KTJ/ml), naopak nejvyšší hodnoty byly naměřeny u filtru N3 v rozsahu 886 – 25341 KTJ/ml (T4, průměrně 11273 KTJ/ml). U filtrů běžných pak byly nejnižšími hodnotami výsledky vzorků u filtru K1 v rozsahu 55 – 155 KTJ/ml (T2, průměrně 99 KTJ/ml), zatímco nejvyšších hodnot bylo dosaženo u filtru K2 2250 – 307023 KTJ/ml (T4, průměrně 140779 KTJ/ml). Naměřené hodnoty však vykazovaly velké odchylky u většiny měření a všech typů filtrů, kdy vzorky odebrané z jednoho filtru dosahovaly řádově

rozdílných hodnot – např. u filtru K2 v testu T5 byly naměřeny hodnoty v rozsahu 28 - 11520 KTJ/ml anebo filtr N3 v testu T6 dosáhl hodnot 25 – 4453 KTJ/ml.

Z naměřených výsledků nebylo možné stanovit, zda se více látek zachytí na filtru nanovlákněm nebo běžném, ani určit vliv vnitřního/vnějšího prostředí případně nastavení ventilátorů. Není zde patrný žádný trend.

Ukazatel plísně

U těchto měření byly naměřeny nejmenší hodnoty u testů T5 a T6, které probíhaly ve vnitřním prostředí. Naměřené výsledky dosahovaly úrovně jednotek KTJ/ml pro filtry N3 a K2 shodně v rozsahu 1 – 19 KTJ/ml.

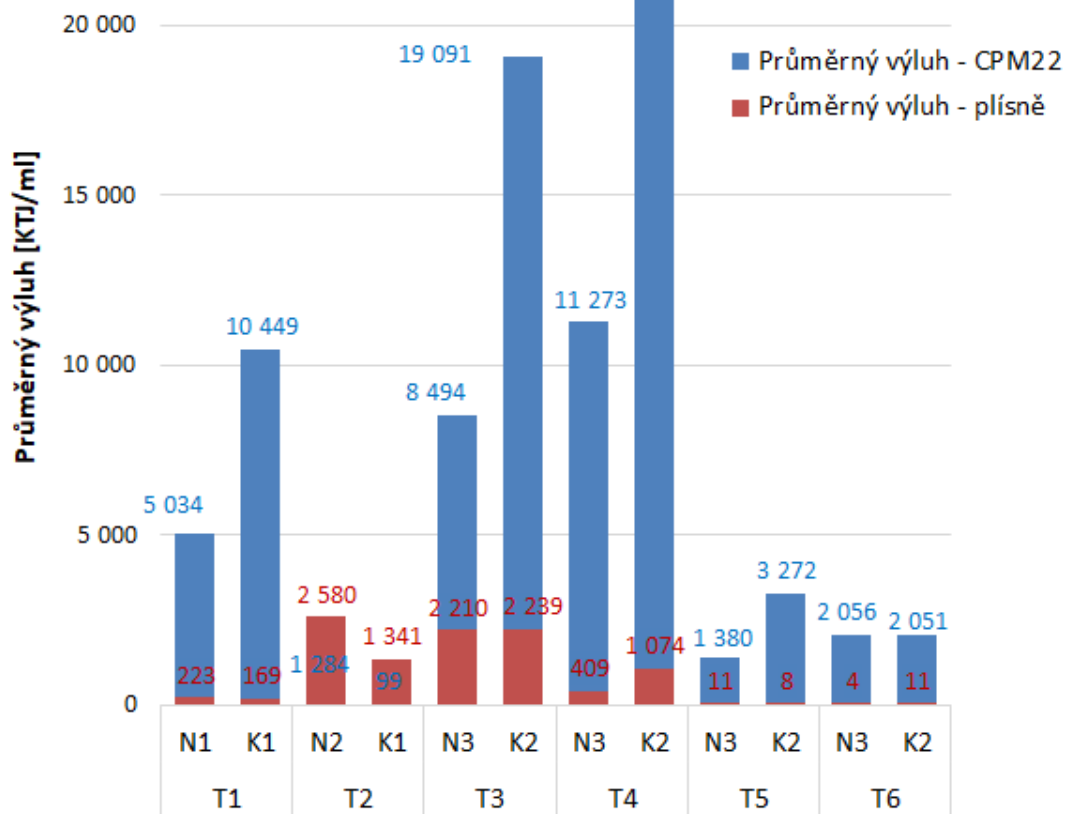
U testů T1 až T4 byla situace obdobná jako u parametru CPM₂₂. U naměřených hodnot nebylo možné vysledovat trend, odlišit různé typy filtrů a různá nastavení. Ve 4 odebraných vzorcích daného filtru se většinou vyskytovala hodnota, která byla řádově jiná, než hodnoty ostatní. Nejnižších hodnot bylo dosaženo u nanovlákněných filtrů při testu T1 u filtru N1 (160 – 310 KTJ/ml, průměrně 223 KTJ/ml), nejvyšších hodnot při testu T2 u filtru N2 (135 – 4280 KTJ/ml, průměrně 1284 KTJ/ml). U filtrů běžných byly nejnižší hodnoty naměřeny při testu T1 u filtru K1 (150 – 180 KTJ/ml, průměrně 169 KTJ/ml), nejvyšší hodnoty při testu T3 u filtru K2 (1568 – 3409 KTJ/ml, průměrně 2239 KTJ/ml).

Výluhy obecně

Rozdíly v naměřených hodnotách různých vzorků odebraných z jednoho filtru jsou značné. Mohly být způsobeny nerovnoměrnou distribucí vzduchu, chybou měření, dodatečnou nebo počáteční kontaminací vzorku. Na základě získaných dat nelze objektivně posoudit důvod pro tyto rozdíly ani vysledovat vztah mezi mírou znečištění a druhem filtrů, a tím stanovit jeho účinnost.

Vzhledem k volbě parametrů se jeví výsledky ukazatele plísně jako hodnověrnější, nicméně ani zde není možné vysledovat a potvrdit jakýkoli trend a vyvodit z něj závěry. Metodika pro porovnání účinnosti filtrů prostřednictvím výluhů z filtrů se tak neukázala být vhodná pro tuto aplikaci.

Sumarizace výsledků je zobrazena na Obrázku 33.



Obrázek 33 - Vyhodnocení účinnosti filtrů pro výluhy

6.8.5 Aplikace ofukované vany

U testů T1, T3 a T4 byla k experimentální jednotce připojena také ofukovaná vana a jejím prostřednictvím zkoušen přenos znečištění prostřednictvím částic do vody. Z této vody byly odebírány vzorky, které byly následně vyhodnoceny na parametry CPM₂₂ a CPM₃₆.

U všech testů byly naměřeny pouze minimální hodnoty pro oba parametry v nejčastějším rozsahu 0 – 2 KTJ/ml, výjimečně (test T4) 1 – 21 KTJ/ml. Tyto hodnoty nevykazovaly trend v tom smyslu, že by s časem měření narůstaly, ale vyskytují se spíše náhodně.

Důvodem může být krátký čas trvání testů, chyba měření, počáteční nebo dodatečná kontaminace vody. Vzhledem k tomu, že proces přestupu kontaminantů do vodního prostředí je dlouhodobým komplexním jevem, navíc nebylo možné naměřit zvýšení znečištění vody a ani tento údaj ztotožnit se zkoušenými filtry, proto ani nebyla potvrzena Hypotéza 4 předpokládající možnost sledování kontaminace během krátkodobého experimentu.

7. Dlouhodobý experiment – příprava realizace

7.1 Volba vhodného filtru a lokality pro dlouhodobý experiment

Na základě provedeného krátkodobého experimentu a získaných informací bylo přistoupeno k experimentu dlouhodobému, kdy byl filtr osazen na ventilační potrubí vodojemu. Pro tuto aplikaci byl zvolen nanovlákený filtr N3, který vykazoval nejlepší výsledky v průběhu krátkodobého zkoušení, zejména v oblasti zachycení mikroorganismů.

Pro dlouhodobý experiment bylo vybráno vhodné vodohospodářské zařízení dle zvolených kritérií:

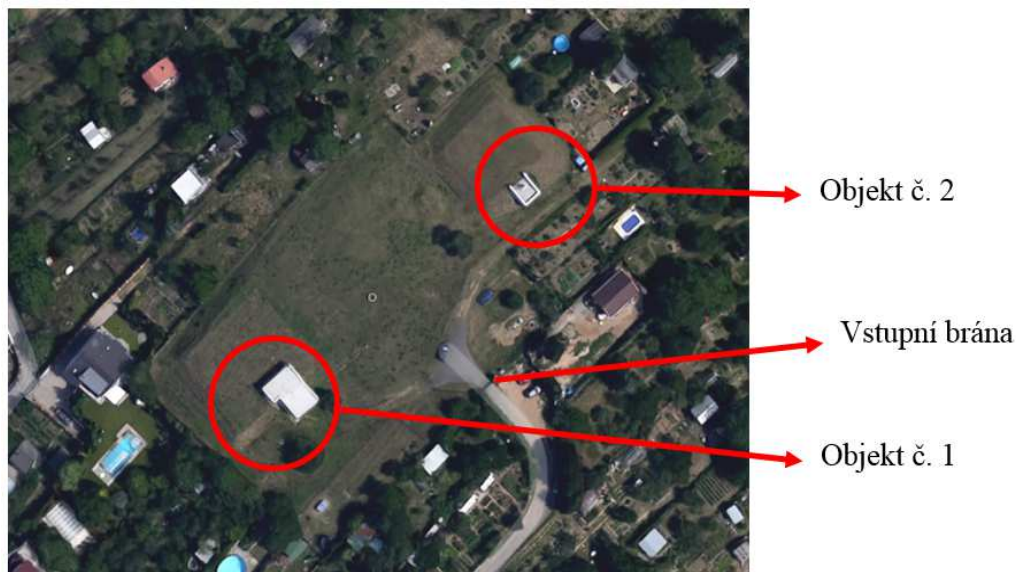
- Běžný (trvalý) provoz zařízení – zvolený vodojem měl být v běžném provozu.
- Minimální délka provozu – zařízení mělo být v provozu alespoň 5 let. Důvodem byly získané provozní zkušenosti s tímto zařízením a tím i zaznamenání případných nestandardních projevů aplikace filtru pravidelnou obsluhou zařízení.
- Dvoulinkový provoz – v případě odstavení jedné linky vodojemu by byly filtry přeneseny do druhé funkční části.
- Dostupnost zařízení

Ve spolupráci s provozovatelem vodárenské sítě byl vybrán funkční dvoulinkový vodojem s dobrou dostupností, viz následující kapitola.

7.2 Popis stávajícího stavu

Vodojem je situován na okraji městské zástavby. Samotný objekt sestává ze dvou akumulčních železobetonových nádrží krytých zeminou s oddělenou armaturní komorou. Každá nádrž má vlastní armaturní komoru. Rozmístění objektů je znázorněno na Obrázku 34.

Vnitřní prostory vodojemu jsou osazeny ventilačním plastovým potrubím o průřezu DN 200 a DN 250. Na potrubí byl osazen filtrační box z pozinkovaného plechu, ve kterém byl umístěn kapsový filtr. Výfuk ventilace je chráněn ventilační mřížkou. V objektu č. 1 byly umístěny dva filtry o velikosti 195 x 195 mm, v objektu č. 2 byl osazen jeden filtr o velikosti 235 x 235 mm.



Obrázek 34 - Rozmístění objektů vodojemu

Prostory jsou charakteristické vysokou vzdušnou vlhkostí, a zejména v zimních měsících na stěnách i na filtrech kondenzuje voda. Proudění vzduchu, tedy nasávání venkovního vzduchu anebo vyfukování vzduchu zevnitř ven, je způsobeno podtlakem a přetlakem při vypouštění či napouštění nádrží s vodou. Riziko kontaminace vody nasávaným vzduchem tedy představuje především proud vzduchu nasávaný při vypouštění vody z vodojemu.

Stávající filtry použité ve vodojemu jsou filtry hrubé, třídy G3. Stávající filtrační boxy spolu s osazenou filtrační textilií jsou znázorněny na Obrázku 35. Oproti tomu zvolený nanovláknový filtr N3 je filtrem vysoce účinným, třídy H10. Filtrační materiál nově osazených filtrů je certifikován pro použití ve vodárenství.



Obrázek 35 - Ventilační potrubí se stávajícími filtračními boxy

7.3 Provozní monitoring

Pro zhodnocení provozních vlastností kapsového filtru byly osazeny 2 ks prototypů kapsového filtru s nanovlákněným materiálem N3 v objektu 1 a v objektu 2. Kapsové filtry byly upevněny v rámečku o rozměrech 50 x 50 cm, který odpovídal rozměru stávajících filtrů. V objektu 1 byl zároveň ponechán jeden z těchto stávajících filtrů, aby byla zachována možnost vzájemného srovnání.

Vzhledem k jejich dlouhodobé aplikaci bylo vyloučeno odebrání filtrů a podrobení mikrobiologickým zkouškám. Zároveň nebylo možné filtry otestovat v experimentálním zařízení, které bylo uzpůsobeno pouze na vkládání menšího rámečku. Z těchto důvodů byl provozní monitoring zaměřen na vizuální měření.

Na lokalitě probíhal provozní monitoring v období od 4.2.2015 do 28.4.2016. Kontrola filtrů byla prováděna ve dnech 9. 2., 25. 2., 27. 3., 18. 5., 5. 8., 8. 10., 16. 12. 2015, 9.2.2016 a 28.4.2016. Během kontrolních návštěv bylo vizuálně sledováno:

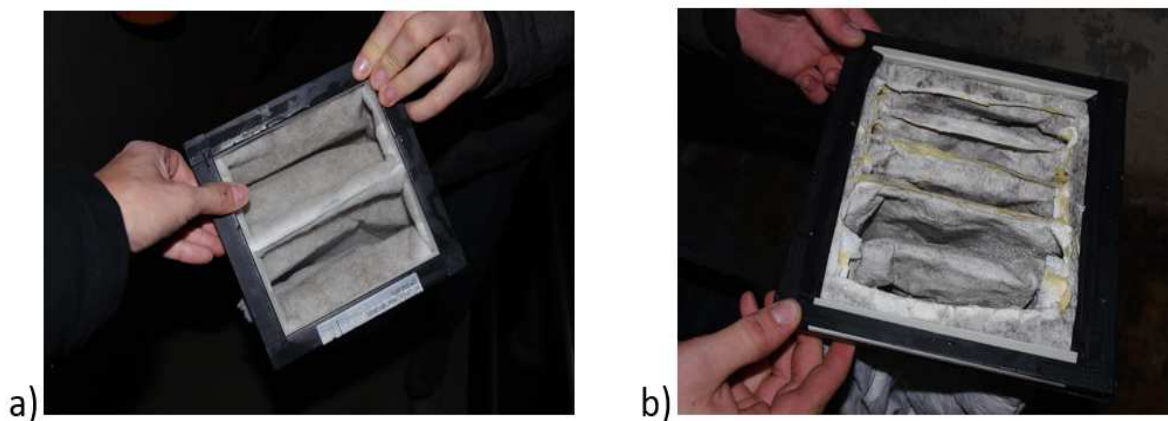
- Znečištění filtru
- Vlhkost filtru
- Konzistence materiálu
- Potrhání filtrů případně jejich jiné poškození

8. Dlouhodobý experiment – výsledky a diskuze

8.1 Vyhodnocení monitoringu

Kontroly filtrů probíhaly dle předepsaného plánu. Na vyjmutých filtrech bylo patrné zanášení filtračních kapes nečistotami. U nanovláčenného filtru bylo pozorováno rychlejší zašednutí filtru oproti stávajícímu filtru. Deformace, či potrhání nanovláčenných filtrů se neobjevovaly.

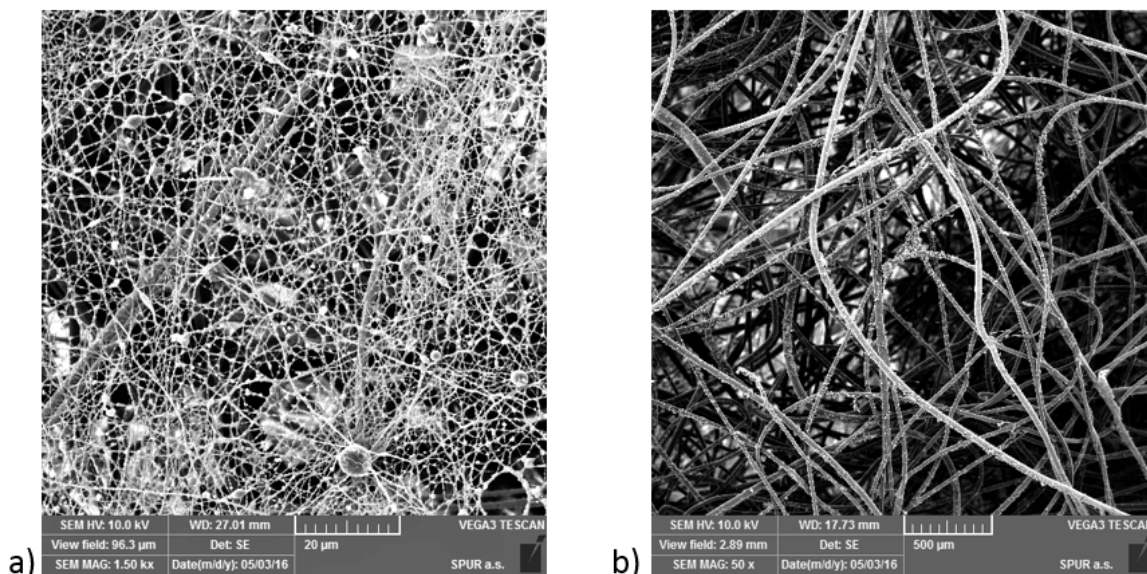
Při vyšší vlhkosti prostředí zejména v zimním období byly oba filtry navlhle až mokré, avšak nedocházelo ke slepování kapes, či deformacím, které by zabránili proudění vzduchu. Nárasty plísní nebyly oproti předešlým stávajícím filtrům pozorovány. Snímky filtrů z kontrolního dne 16.12.2015, viz Obrázek 36.



Obrázek 36 - Kontrola filtrů a) Nanovláčenný filtr b) Stávající filtr

Dle informací obsluhy nenastaly v průběhu zkoušení žádné provozní komplikace. Nebyl problém s otevřením ani zavřením dveří objektu, nebyl pozorován podtlak ani přetlak při manipulaci s dveřmi ve vodojemu.

Při posledním kontrolním dnu 28.4.2016. byly běžný filtr i filtr nanovláčenný odebrány a nahrazeny filtry novými, nanovláčennými, typu N3. Použité filtry byly podrobeny analýze na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM), viz Obrázek 37. Snímky odpovídají skutečnému stavu, nanovláčenný filtr byl zvětšen 1500 krát, zatímco stávající filtr 50 krát. Ani prostřednictvím této metody nebylo pozorováno poškození filtru nebo úbytek účinných vrstev.



Obrázek 37 - Snímky SEM, a) Nanovláknový filtr b) Stávající filtr

8.2 Diskuze k aplikaci nanovláknových filtrů v dlouhodobém experimentu

Pro zvýšení zachytu prachových částic a mikrobiálního znečištění nasávaného vzduchu byly v rámci dlouhodobého experimentu odzkoušeny kapsové nanovláknové filtry třídy H10 v objektu vodojemu. Účelem zkoušení bylo zjištění, zda jsou nanovláknové filtry účinnější než stávající filtry filtrační třídy G3. Dalším důvodem bylo ověření funkčnosti filtrů při dlouhodobém zatížení v náročných podmínkách.

Během dlouhodobého experimentu nebyly zjištěny nedostatky nového filtru a byla prokázána uplatnitelnost nanovláknových filtrů ve ventilačních systémech vodárenských objektů. Byla tak potvrzena Hypotéza 5, která předpokládala, že nanovláknové filtry zajistí ochranu vodárenských zařízení.

Z hlediska provozních limitů je nutné vycházet z místních podmínek. Při běžném provozu a zatížení je dostatečné vyměnit filtry jednou ročně.

Obavy, že při záměně filtrů za filtry s vyšší filtrační účinností může dojít k rychlému zanesení filtru a tím k omezení proudění vzduchu, se nepotvrdily. Podobně nebylo u filtrů pozorováno žádné narušení filtrační vrstvy. Díky tomuto pozorování je proto možné potvrdit Hypotézu 6, která předpokládala, že nanovláknové filtry budou pro tuto aplikaci vhodné. Nebyly pozorovány žádné provozní potíže při používání nového typu filtru. Použitím filtrů s vyšší filtrační účinností naopak došlo ke zvýšení účinnosti zachytu částic

z původních 80-90 % na více než 99 %, což jsou deklarované výrobní hodnoty odpovídající filtračním třídám obou filtrů.

Technické provedení rámečků do filtračních boxů bylo identické s předchozí variantou řešení, nebyly proto nutné žádné stavební ani technologické úpravy.

8.3 Využití poznatků dlouhodobého experimentu

Na základě zkušeností z dlouhodobého experimentu při aplikaci nanovláknenných filtrů byl vytvořen finální tvar filtru, a to vytvořením dvou kapes vsazených do plastového rámečku. Touto aplikací byla zajištěna dostatečná filtrační plocha při zachování stávajícího průřezu osazeného filtru. Podmínkou této aplikace byla kompatibilita se stávajícími filtračními boxy. Filtry jsou zobrazeny na Obrázcích 38 a 39.



Obrázek 38 - Finální tvar filtru



Obrázek 39 - Osazení nanovláknenného filtru do stávajícího filtračního boxu

9. Závěr

Hlavním tématem dizertační práce bylo využití filtru z nanovláken pro filtraci vzduchu zejména v náročných podmínkách vodárenských zařízení, a to z důvodu snížení rizika sekundární kontaminace vnitřního prostředí akumulčních prostorů a pitné vody. Dle provedeného zkoumání, zkušeností provozovatelů i rešerše literatury jsou ventilační systémy běžně chráněny hrubými filtry, v horším případě netkanou textilií případně ventilační mřížkou.

Součástí výzkumu bylo sestavení vhodné metodiky zkoušení, konstrukce experimentálního zařízení pro ověření předpokladů, krátkodobé zkoušení filtrů nanovlákených i běžně používaných, vyhodnocení výsledků experimentu a následné přikročení k experimentu dlouhodobému a jeho vyhodnocení. Nanovlákený filtr prokázal své vlastnosti i vysokou účinnost filtrace v porovnání s běžně používanými filtry. Na základě vyhodnocení dlouhodobého zkoušení v reálném provozu je možné jej použít pro ochranu ventilačního systému vodárenských zařízení.

S ohledem na zaměření filtru na snížení znečištění sekundárními kontaminanty byla vytvořena metodika zkoušení, která v sobě kombinuje jak měření standardních fyzikálních veličin (rychlost vzduchu, teplota prostředí a tlaková diference filtru), tak vyhodnocení ukazatelů organického znečištění (celkový počet mikroorganismů a počet plísní), a to ze vzdušného spadu před a za filtrem, z výluhu filtračního materiálu, a také z vody, kam byl nasměrován výfuk filtrovaného vzduchu. Metodika i výběr sledovaných parametrů se osvědčily u všech měření fyzikálních veličin. Dostatečné množství informací k vyhodnocení účinnosti zkoušených filtrů poskytla měření spadů pro ukazatele CPM₂₂ a plísně. Naproti tomu metodika zkoušení prostřednictvím výluhu ze zkoušených filtrů se ukázala jako nevhodná, výsledná data nebylo možné jednoznačně interpretovat. Podobně tomu bylo u odebraných vzorků vody z ofukované vany umístěné na výfuku vzduchu za experimentální jednotkou, kdy nebyl prokázán přestup mikroorganismů do vody. Navíc výsledky nebylo možné jednoznačně interpretovat a zvolená metodika se neukázala být vhodnou pro tuto aplikaci.

Tlaková ztráta nanovlákených filtrů byla vyšší, než tlaková ztráta filtrů běžných. Vzhledem k pasivnímu využití filtru a tedy i nulovému energetickému požadavku není

nutné brát na jejich vyšší tlakovou ztrátu ohled, pro zvolenou aplikaci byla stále dostačující.

Okolní prostředí mělo vliv na množství zachycených kontaminantů. U testů, které proběhly ve venkovním prostředí, bylo zachyceno výrazně vyšší množství částic než u testů provedených ve vnitřních prostorech. Zde docházelo především k zachycení částic prachu, které způsobily zbarvení povrchu filtru z bílé barvy na šedou. Vliv na velikost zatížení mikroorganismy a plísněmi má také sezónnost, aktuální počasí a povětrnostní podmínky. Tyto vnější vlivy mohou ovlivnit nejen hodnoty naměřených spadů, ale také hodnoty měřených fyzikálních veličin – k tomuto ovlivnění došlo při testu T4.

V průběhu zkoušení nebyl jednoznačně potvrzen předpoklad, že se vzrůstajícím průtokem vzduchu vzroste také počet zachycených kontaminantů před filtrem. Toto tvrzení bylo totiž potvrzeno pouze u jednoho ze dvou měřených ukazatelů, parametru CPM₂₂. U ukazatele plísně byly naměřeny hodnoty, které tomuto tvrzení neodpovídaly. Obecně lze ovšem pozorovat vztah mezi průtokovým množstvím vzduchu a zachyceným množstvím mikroorganismů před filtrem.

Při srovnání úrovně spadů za filtrem byla naměřena vysoká účinnost nanovlákných filtrů při zachycení mikroorganismů pro parametry CPM₂₂ i plísně. Nanovláknými filtry prošlo 0 – 20 % částic naměřených také před filtrem. Oproti tomu běžné filtry měly účinnost těchto látek nižší, u filtru K1 odpovídala měření částic za filtrem hodnotám v rozsahu 74 – 96 %, u filtru K2 to bylo 17 – 86 % pro oba měřené parametry. Při porovnání konkrétních testů pak vycházela schopnost zachycení mikroorganismů jednoznačně lépe pro filtry nanovlákné.

Výluhové testy nepotvrdily filtrační účinnosti z důvodů vysoké rozkolísanosti výsledků. Na základě získaných dat nebylo možné objektivně posoudit vztah mezi mírou znečištění a druhem filtrů, a tím stanovit jejich účinnost nebo popsat převládající trend. Nicméně naměřené hodnoty potvrzují zachycení mikroorganismů na všech druzích zkoušených filtrů, a to pro ukazatele CPM₂₂ i plísně. Na základě naměřených hodnot nebylo možné zjistit skutečnou příčinu rozkolísanosti.

Aplikace vany na výfuku z filtrační věže neprokázala dostatečně vhodnost aplikace této části metodiky. Naměřené hodnoty byly minimální a nevykazovaly žádný trend, výskyt vyšších hodnot byl spíše náhodný. Na základě naměřených výsledků, kdy se zjištěné

hodnoty pohybovaly v řádu jednotek, nebylo možné zaznamenat snížení kvality vody a tento údaj ztotožnit se zkoušenými filtry.

Byly srovnávány také jednotlivé typy filtrů v rámci svých skupin. Zatímco filtr K2 prokázal vyšší filtrační účinnost oproti filtru K1, u nanovlákných filtrů byl rozdíl v účinnosti filtrace minimální. Různé typy materiálů účinných nanovlákných vrstev se výrazně neprojevily. Nejvyšší účinnost, zejména v oblasti zachytu mikroorganismů, vykazoval filtr N3.

Na základě vyhodnocení testů krátkodobého experimentu byl vybrán nanovlákný filtr N3 k dlouhodobému experimentu v reálných podmínkách vybraného vodojemu. V průběhu zkoušení nebyly pozorovány žádné provozní potíže, nedošlo k poškození filtrů ani k jeho deformaci. Rovněž se nepotvrdil předpoklad o rychlém zanesení nanovlákných filtrů, který byl i na konci testovacího období schopen zabraňovat vzniku podtlaku či přetlaku ve vnitřních prostorách a zároveň zachytávat polutanty. Po ukončení zkušebního provozu byla potvrzená aplikace těchto filtrů na ostatních vodojemech provozovatele.

Hlavním přínosem této práce je potvrzení možnosti aplikace nanovlákných filtrů ve vodárenských zařízeních, a to na základě krátkodobého experimentu dle navržené metodiky a po potvrzení funkčních vlastností nanovlákných filtrů při dlouhodobém experimentálním provozu. Mezi ostatní přínosy práce se řadí zejména:

- Prokázání zvýšení ochrany zařízení osazením nanovlákného filtru.
- Prohloubení znalostí o vlivech působících na účinnost procesu filtrace.
- Prohloubení znalostí o stávajících filtračních materiálech a jejich porovnání s materiály nanovláknými.
- Prohloubení znalostí o sekundární kontaminaci vody prostřednictvím vzduchu.
- Propojení znalostí z oborů vodárenství, vzduchotechnika, nanotechnologie a mikrobiologie.

Problematika sekundární kontaminace vody bývá opomíjena při návrzích vodojemů i při jejich rekonstrukcích. Proto by mohlo být nalezení řešení jejich dodatečného

efektivního zabezpečení bez nutnosti rozsáhlých stavebních a technologických úprav pozitivní zprávou pro provozovatele vodovodních sítí.

Další fáze výzkumu této tematiky by se měla zaměřit na hlubší prozkoumání účinnosti nanovlákných filtrů s tlakovou ztrátou blízkou běžně používaným filtrům. Rovněž by bylo vhodné najít takovou metodiku, kterou by bylo možné jednoznačně ověřit množství kontaminantů, které se zachytí přímo na filtru a dle této hodnoty potvrdit jejich filtrační účinnosti.

Jinou možností budoucího zkoumání je aplikace takového filtračního materiálu, který by zabraňoval množení částic a bakterií, či spor plísní přímo na povrchu filtru. Zvláště v případech s vysokou vlhkostí je toto riziko vyšší. Materiál se zvýšenou odolností vůči bakteriím je aktuálně vyvíjen, jeho rezistence je dána použitím nanočástic stříbra pevně ukotvených na nanovlákněch PU.

10. Seznam zkratk

CPM	Celkový počet mikroorganismů
ČSN	Česká státní norma
DEHS	DiEthylHexaSubacate ($C_{26}H_{50}O_4$)
DOP	DiOctylPhtalate
HEPA filtr	High Efficiency Particulate Air filtr
KTJ	Kolonie tvořící jednotky
MPPS	Most Penetrating Particle Size
NICNAS	The National Industrial Chemicals Notifications and Assesment Scheme
nNT	Nanovláknenná Textilní vrstva
PCA	Živné médium, obchodní název Plate Count Agar
PET	Polyetylentereftalát
PU	Polyuretan
PVDF	Polyvinylidenfluorid
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
VS	Viskóza

11. Seznam použitých zdrojů a literatury

Literární zdroje

- [1] AL-ATTABI, R.; DUMÉE, L.F.; KONG, L.; SCHÜTZ, J.A.; MORSI, Y.: *High Efficiency Poly(acrylonitrile) Electrospun Nanofiber Membranes for Airborne Nanomaterials Filtration*, Advanced Science News, 2017, p1700572.
- [2] BARHATE, R., RAMAKRISHNA, S. *Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials*. Journal of Membrane Science, 2007, vol. 296, no. 1–2, p. 1–8.
- [3] BENEŠ, M., ČEFELÍN, P., KÁLAL, J., KRATOCHVÍL, P., KUČERA, M., MEISSNER, B., POUCHLÝ, J., ZACHOVAL, J., *Základní definice termínů vztahujících se k polymerům*, Chemické listy, 1985, svazek 79, str. 284.
- [4] BERNARD, J., FRÍČ, L., RUBINOVÁ, O., POČINKOVÁ, M., RUBINA, A., JELÍNEK, O.: *Microbiological aspects of energy-efficient HVAC (ventilation) systems houses*, Advanced Materials Research. 1041. 354-357. 10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.354.
- [5] BIELA, R.: *Vodárenská flotace a její použití při úpravě pitné vody v ČR*. Příspěvek zpracovaný v rámci řešení grantového specifického výzkumu VUT v Brně s názvem „Progresivní metody úpravy vody a jejich účinnost“ (FAST-S-11-24/1224); Brno, 2012.
- [6] ČSN EN 779 *Filtry atmosférického vzduchu pro odlučování částic u běžného větrání*. Praha: Úřad pro techn. normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [7] ČSN EN 1822-1 až 5 *Vysoce účinné filtry vzduchu (HEPA a ULPA)*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [8] ČSN 75 5355 *Vodojemy*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [9] ČSN ISO 21527 *Mikrobiologie potravin a krmiv – Horizontální metoda stanovení počtu kvasinek a plísní*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

- [10] FACCINI, M.; VAQUERO, C.; AMANTIA, D.; *Development of Protective Clothing against Nanoparticle Based on Electrospun Nanofibers*, Journal of Nanomaterials, 2012, p892894.
- [11] GAFFET, E., *Nanomaterials: a review of the definitions, applications, health effects*. 2012, Nanomaterial Research Group, str. 2.
- [12] HEMERKA, J.: *Filtrace atmosférického vzduchu*. Přednáška, Praha: ČVUT, 2009.
- [13] HENDL, J.: *Přehled statistických metod zpracování dat: Analýza a metaanalýza dat*, Portál, 2012, ISBN 978-80-262-0200-4.
- [14] HUNG, C. H.; LEUNG; W., W., F.; *Filtration of nano-aerosol using nanofiber under low Peclet number and transitional flow regime*. Sborník Separation and Purification Technology 79, 2011; 34-42.
- [15] CHLOUPEK, J., SUCHÝ, P.; *Mikroklimatická měření ve stájích pro hospodářská zvířata*. Multimediální učební text, Veterinární a farmaceutická univerzita Brno, Fakulta veterinární hygieny a ekologie, Brno, 2008.
- [16] KOŠŤÁKOVÁ, E., *Výroba polymerních nanovláken (s výjimkou elektrostatického zvláknování)*; Přednáška, Liberec: TUL, 2011.
- [17] KOUTKOVÁ, H.: *Úvod do pravděpodobnosti a matematické statistiky (přepracované vydání)*, CERM, Brno, 2001, ISBN 80-214-1811-7.
- [18] LEV, J.; HOLBA, M.; DOŠEK, M.; KALHOTKA, L.; KIMMER, D.: *Mikrofiltrační nanovláknenné materiály*; Projekt: Vhodné materiály pro nanotechnologické aplikace při čištění a úpravě vody a vzduchu, TA01010356, Brno, 2013.
- [19] LIN, T., *Nanofibers – Production, Properties and Functional Application*, InTech Publisher, 2011, ISBN 978-953-307-420-7.
- [20] LITSCHMANNOVÁ, M.: *Úvod do statistiky (interaktivní studijní text)*, VŠB - Technická univerzita Ostrava, Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [21] LUKÁŠ, D., SARKAR, A., MARTINOVÁ, L., VODSEĎÁLKOVÁ, K., LUBASOVÁ, D., CHALOUPEK, J., POKORNÝ, P., MIKEŠ, P., CHVOJKA, J. and KOMÁREK, M., *Physical principles of electrospinning (Electrospinning as a nano-scale technology of the twentyfirst century)*, Textile progress, 2009, str.59-78.

- [22] PALČÍK, J.; SLÁDEČKOVÁ, A.; MERGL, V.; MARŠÁLKOVÁ, E.: *Vliv odradonovacího zařízení na kvalitu vody*. Článek: Pitná voda 2012, Tábor, 2012.
- [23] RUBINOVÁ, O., RUBINA, A., BERNARD, J., FRIČ, L.: *Mikrobiální mikroklima budov*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov, Projekt FAST-S-15-2620, 2015.
- [24] ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, J.; HUBÁČKOVÁ, J.; ČIHÁKOVÁ, I.: *Konstrukční uspořádání, provoz a údržba vodojemů*, Technické doporučení; Praha: Hydroprojekt CZ a.s., 2008.
- [25] ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, J.; ŘÍHA, J.; MARTÍNEK, R.: *Kapacita filtračních náplní vzduchových filtrů*; Trenčianské Teplice: Pitná voda 2013, str. 63 - 70
- [26] ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, J.; ŘÍHA, J.; HUBÁČKOVÁ, J.; ČIHÁKOVÁ, I.: *Složení nárostů a charakter sedimentů ve vodojemech*. Projektu 1G58052 Výzkum řešení degradace jakosti pitné vody při její akumulaci, Praha, 2012.
- [27] ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, J.; ŘÍHA, J.: *Provozně odzkoušené filtrační jednotky – řešení eliminace sekundární kontaminace vzduchem*. SOVAK, 2008; 14 – 17.
- [28] ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, J.; ŘÍHA, J.; HUBÁČKOVÁ, J.; ČIHÁKOVÁ, I.: *Prevence a minimalizace rizik související s provozem vodojemů*. Projekt MŠM 6046137308, Praha, 20008.
- [29] ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, J.; ŘÍHA, J.; ADÁMKOVÁ, J.: *Impregnace filtračních náplní nanočásticemi kovů a standardy jejich bezpečného provozu*. Projekt č. DF11P01OVV012, Praha, 2013.
- [30] Sbíрка zákonů 2003, částka 4, Vyhláška č. 6 ze dne 16. prosince 2002, kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb, 2003.
- [31] SUNDARRAJ, S.; RAMAKRISHNA, S.: *New direction in Nanofiltration Applications – Are Nanofibers the Right Materials as Membranes*. Desalination? Desalination 308, 2013, p 198-208.
- [32] SUNDARRAJAN, S., TAN, K., L., LIM, S., H., RAMAKRISHNA, S. *Electrospun Nanofibers for Air Filtration Applications*. In Procedia Engineering. In International Conference on Materials for Advanced Technologies, Symposium W – Advanced Structural and Functional Materials for Protection, 2014, vol. 75, p.159

- [33] ŠIRC, J., HOBZOVÁ, R., KOSTINA, N. MUNZAROVÁ, M., JUKLIČKOVÁ, M., LHOTKA, M., KUBINOVÁ, Š., ZAJÍCOVÁ, A., MICHÁLEK, J., *Morphological Characterization of Nanofibers: Methods and Application in Practice*, Journal of Nanomaterials, 2012, Article ID327369, Hindawi Publishing Corporation.
- [34] TUHOVČÁK, L.; ADLER, L.; KUČERA, T.; RACLAVSKÝ, J.: *Vodárenství, část A. Úprava vody*. Brno, 2006; 12 – 18.
- [35] VINCENT, I.: *Informace o nanotextiliích fy SPUR a.s.* Sborník SPUR a.s., 2015.
- [36] VINCENT, I; KIMMER, D.: *Nanostrukturované filtrační materiály SpurTex®. 2015*. Zlin: SPUR a.s., 2015.
- [37] VINCENT, I; KIMMER, D.: *Gas and Liquid Filtration: Application of nanofibers*. Zlin: SPUR a.s., 2015.
- [38] WOOLEVER, J.; *Top 5 Reasons a Nanofiber Performance Layer Filter is Worth It* Donaldson Filtration Solutions.
- [39] YUN, K. M.; SURYAMAS, A. B.; ISKANDAR, F.; BAO, L.; NIMUMA, H.; OKUYAMA, K.: *Morphology optimization of polymer nanofiber for applications in aerosol particle filtration*. Sborník Separation and Purification Technology 75, 2010; 340-345.
- [40] ZHANG, L.; LUO, J.; MENKHAUS, TJ.; VARADARAJU, H.; SUN, Y.; FONG, H.: *Antimicrobial Nano-fibrous Membranes Deveolped from Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibers*, Journal of Membrane Science, 369, 2011, p 8.
- [41] ZHU, M., HAN, J., WANG, F., SHAO, W., XIONG, R., ZHANG, Q., PAN, H., YANG, Y., SAMAL, S., ZHANG, F.; *Electrospun Nanofibers Membranes for Effective Air Filtration*. Wiley Online Library, Macromolecular Materials and Engineering, Volume 302, Issue 1, 2016.

Další použité zdroje

- [42] http://www.khsova.cz/01_aktuality/nanotechnologie.php?datum=2009-03-18
- [43] <http://www.spur-nanotechnologies.cz/produkty>
- [44] <http://www.spur-nanotechnologies.cz/technologie&lang=CZ>

12. Seznam obrázků

Obrázek 1 -	Příklady filtrů: a) Deskový b) Kapsový c) Skládaný kazetový filtr	21
Obrázek 2 -	Pásový odvinovací filtr	22
Obrázek 3 -	Příklad sorpčního filtru	24
Obrázek 4 -	Výroba nanomateriálu průtahem [16]	26
Obrázek 5 -	Nanomateriál vytvořený samosestavováním [16]	27
Obrázek 6 -	Nanomateriál vytvořený metodou melt-blowing [16]	28
Obrázek 7 -	Nanomateriál vytvořený metodou Islands in the Sea [16]	28
Obrázek 8 -	Elektrostatické zvlákňování z trysky, schéma [21]	30
Obrázek 9 -	Taylorův kužel (levá část); Bičovací fáze letu (pravá část) [16]	30
Obrázek 10 -	Vzdušná kontaminace; a) Nechráněný průduch b) Vzduchotechnická trouba zrezivělá, nechráněná, ústící nad akumulací prostor [27]	37
Obrázek 11 -	Nejčastější kontaminanty vodárenských zařízení [24]	39
Obrázek 12 -	a) Filtr s nanovláknennou vrstvou b) Filtr bez nanovlákn. vrstvy [38]	43
Obrázek 13 -	Uložení vzorků do chladicího boxu	53
Obrázek 14 -	Ukázka kultivovaného vzorku – ukazatel CPM ₂₂	54
Obrázek 15 -	Rozmístění vzorků pro mikrobiologickou analýzu filtru	55
Obrázek 16 -	Měřicí mřížka průtočného profilu	58
Obrázek 17 -	Experimentální zařízení pro výzkum filtrů	59
Obrázek 18 -	Ventilátorová filtrační věž – zadávací schéma	60
Obrázek 19 -	Ventilátorová filtrační věž – čelní panel	61
Obrázek 20 -	Pohled do hlavní filtrační komory	62
Obrázek 21 -	Ventilátorová filtrační věž - realizace	63
Obrázek 22 -	Ofukovaná vana - realizace	64
Obrázek 23 -	Příklad upevnění filtru v rámečku	65
Obrázek 24 -	Skladba nanovláknenných filtrů	66
Obrázek 25 -	Mikroskopický snímek vrstvy nanovláken	66
Obrázek 26 -	Filtr K1 osazený v rámečku	69
Obrázek 27 -	Vrstvy běžného filtru K2	70
Obrázek 28 -	Charakteristika filtrů při testech T1 – T6	91
Obrázek 29 -	Vliv prostředí a vnějších vlivů na výsledky testů	93
Obrázek 30 -	Zanesení filtru N3 prachem po ukončení testu T6	94

Obrázek 31 - Průměrný spad - CPM ₂₂	96
Obrázek 32 - Průměrný spad - plísň 97	97
Obrázek 33 - Vyhodnocení účinnosti filtrů pro výluhy	100
Obrázek 34 - Rozmístění objektů vodojemu	102
Obrázek 35 - Ventilační potrubí se stávajícími filtračními boxy	103
Obrázek 36 - Kontrola filtrů a) Nanovláknový filtr b) Stávající filtr	104
Obrázek 37 - Snímky SEM, a) Nanovláknový filtr b) Stávající filtr.....	105
Obrázek 38 - Finální tvar filtru.....	106
Obrázek 39 - Osazení nanovláknového filtru do stávajícího filtračního boxu	106

13. Seznam tabulek

Tabulka 1 -	Třídy běžných filtrů dle normy ČSN EN 779 [6].....	14
Tabulka 2 -	Třídy vysoceúčinných filtrů dle normy ČSN EN 1822 [7]	15
Tabulka 3 -	Charakteristické metody výroby nanomateriálů [16].....	29
Tabulka 4 -	Doporučená četnost výměny filtrů	42
Tabulka 5 -	Charakteristika nanovlákných filtrů	67
Tabulka 6 -	Charakteristika běžných filtrů	70
Tabulka 7 -	Základní charakteristika testů.....	71
Tabulka 8 -	Výsledky testu T0.....	74
Tabulka 9 -	Výsledky testu T1 - průměry měření.....	78
Tabulka 10 -	Výsledky testu T2 - průměry měření.....	80
Tabulka 11 -	Výsledky testu T3 – průměry měření	82
Tabulka 12 -	Výsledky testu T4 – průměry měření	84
Tabulka 13 -	Výsledky testu T5 – průměry měření	86
Tabulka 14 -	Výsledky testu T6 – průměry měření	88

14. Seznam příloh

Příloha 1: Přehled charakteristik statistických souborů - měření rychlosti

Příloha 2-1: Výsledky měření - test T0

Příloha 2-2: Výsledky měření - test T1

Příloha 2-3: Výsledky měření - test T2

Příloha 2-4: Výsledky měření - test T3

Příloha 2-5: Výsledky měření - test T4

Příloha 2-6: Výsledky měření - test T5

Příloha 2-7: Výsledky měření - test T6

Příloha 3: Protokol o měření