

**Univerzita Pardubice**

**Fakulta chemicko-technologická**

**Ústav environmentálního a chemického inženýrství**

**Odstraňování těkavých organických látek z  
vnitřního prostředí adsorpcí**

**Diplomová práce**

**Bc. Jakub Linha**

**2025**

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2024/2025

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Linha**  
Osobní číslo: **C23299**  
Studijní program: **N0711A130013 Chemické a procesní inženýrství**  
Specializace: **Chemické inženýrství**  
Téma práce: **Odstraňování těkavých organických látek z vnitřního prostředí adsorpce**  
Zadávací katedra: **Ústav environmentálního a chemického inženýrství**

## Zásady pro vypracování

- Zpracujte literární rešerši ohledně využití adsorpce při odstraňování těkavých organických látek (VOC) z ovzduší pomocí různých druhů sorbentů. Pozornost zaměřte na adsorpci na netkaných textilích s aktivním uhlím (Activated Carbon Fiber ACF).
- Navrhněte a sestavte zařízení pro měření adsorpčních testů a určení účinnosti adsorpce těkavých organických látek na netkaných textilích s aktivním uhlím a ověřte jeho funkčnost. Vypracujte metodiku měření pro stanovení účinnosti adsorpce na vyvinutém zařízení.
- Pro vybrané ACF textilie stanovte jejich základní charakteristiky a proměřte tzv. průrazové křivky pro vybrané modelové organické těkavé látky při jejich různých koncentracích ve směsi se vzduchem a při různých rychlostech proudění těchto modelových směsí.
- Získaná experimentální data vhodným způsobem zpracujte a vyhodnoťte. Provedte diskuzi výsledků.
- Diplomovou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací v platném znění.

Rozsah pracovní zprávy:  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Bedřich Šiška, CSc.**  
Ústav environmentálního a chemického inženýrství

Konzultant diplomové práce: **Ing. Max Fraenkl, Ph.D.**  
Centrum materiálů a nanotechnologií

Datum zadání diplomové práce: **5. února 2025**  
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

L.S.

---

**prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.**  
děkan

---

**prof. Ing. Liběna Tetřevová, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 5. února 2025

### **Prohlášení autora:**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47 b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 9. 5. 2025

Bc. Jakub Linha

Poděkování:

Speciální poděkování a respekt patří v neposlední řadě Ing. Maxovi Fraenklovi Ph. D. za obrovské usilí a trpělivost při tvorbě této práce.

Rád bych touto formou poděkoval paní Ing. Helena Bendová Ph. D. a následně panu Ing. Bedřichu Šiškoví, CSc. za vedení této diplomové práce.

Také bych chtěl poděkovat Ing. Iva Voleská Ph. D. za cenné rady při dimenzování experimentálního setupu, prezentování a jejímu psu Cidovi za morální podporu a podporu psychické stability.

Z FEI si mé poděkování zaslouží rozhodně Ing. Pavel Rozsival za tvorbu programu, který zefektivnil analýzu výstupních dat.

V neposlední řadě si mé poděkování zaslouží i lidé, bez kterých by sestavený setup neměl aktuální podobu, a tedy jejich role v této práci byla klíčová. Těmito lidmi jsou: sklář Michal Patříčný a Vedoucí dílen FCHT, Milan Reinberk.

Rovněž chci poděkovat projektu LM2023037 Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR za finance, které tento projekt umožnily.

## Anotace

Netkané textilie z uhlíku, to je svět budoucnosti,  
v jejich vláknech leží síla, ve struktuře možnosti.

Filtrace vzduchu, adsorpce látek těkavých,  
materiál budoucna, v aplikacích pravdivých.

Směs vzduchu s acetonem či toluenem byla stvořena,  
stabilizace proudění pečlivě ověřena.

Detektory napětí každou sekundu snímaly,  
koncentrace VOC přesně ukázaly.

Jedna vrstva, dvě i tři – u vzorku B jsme testovali,  
schopnost adsorpce více vrstev jsme ověřovali.  
Výsledky nám odhalily sílu uhlíkových vláken,  
v budoucnu budou základem mnoha aplikací a zázrakem.

Tento výzkum není práce – je to krok vpřed,  
k materiálům, co změní svět.

## Klíčová slova

těkavé organické látky, adsorpce, netkané textilie, aktivní uhlíkové vlákno, adsorbční kapacita

## Annotation

Nonwoven carbon textiles, a future so bright,  
In their fibers lies the power to fight.

Filtering air, adsorbing VOC,  
A material of promise, a marvel to see.

Air mixed with acetone or toluene's might,  
Stabilized flow ensured conditions were right.

Detectors each second recorded the trace,  
Concentrations revealed with precision and grace.

One layer, two, and then came three,  
Sample B showed its capacity to agree.  
Adsorption grew with layers aligned,  
A future in filtration perfectly designed.

This research is not just a task—it's a leap ahead,  
To materials that shape the world we tread.  
Nonwoven carbon textiles hold the key,  
Their potential shines for all to see.

#### Keywords

volatile organic compounds, adsorption, nonwoven textiles, activated carbon fibre

## Obsah

1.	Úvod.....	10
2.	Teoretická část.....	11
2.1	Těkavé organické látky .....	11
2.1.1	Vliv VOC na kvalitu vzduchu v interiéru .....	11
2.1.2	Metody detekce a analýzy VOC.....	12
2.1.3	Zdravotní dopady expozice VOC.....	14
2.2	Adsorpce.....	16
2.2.1	Fyzikální adsorpce .....	16
2.2.2	Chemisorpce.....	17
2.2.3	Adsorpční rovnováha .....	18
2.2.4	Využití adsorpce.....	19
2.2.5	Vlastnosti adsorbentů .....	22
2.2.6	Typické příklady adsorbentů.....	23
2.2.7	Vyhodnocení dynamické rovnováhy adsorpce .....	24
2.3	Aktivní uhlí .....	26
2.3.1	Distribuce pórů a afinita aktivního uhlí.....	26
2.3.2	Historie používání aktivního uhlí.....	27
2.3.3	Výroba a formy aktivního uhlí .....	27
2.3.4	Mechanismus adsorpce na AC .....	30
2.3.5	Aplikace aktivního uhlí .....	30
2.3.6	Regenerace aktivního uhlí.....	30
2.3.7	Přehled metodologie testování ACF .....	32

3	Experimentální část .....	33
3.1	Laboratorní zařízení pro testování účinnosti adsorpce.....	33
3.2	Metody charakterizace ACF Charakterizace vzorků ACFA.....	37
3.2.1	BET analýza .....	37
3.2.2	Elektronová mikroskopie (SEM) .....	38
3.2.3	Měření tlakové ztráty .....	38
3.2.4	DTA/TG analýza .....	39
3.3	Metodika experimentu.....	40
4.	Výsledky a diskuze.....	44
4.1	Kalibrace .....	46
4.1.1	Analýza odezvy fotoionizačních detektorů .....	46
4.1.2	Autokalibrace .....	47
4.2	BET analýza – charakteristika ACF .....	48
4.2.1	Specifická povrchová plocha .....	49
4.2.2	Specifický objem pórů .....	49
4.3	DTA/TG analýza – charakteristika ACF .....	50
4.3.	Stanovení tlakových ztrát vzorků a referenčního materiálu.....	51
4.4	Vyhodnocení adsorpce .....	52
4.4.1	Vyhodnocení adsorpce acetonu.....	52
4.4.2	Vyhodnocení adsorpce toluenu .....	57
4.5	Sekvenční elektronová mikroskopie .....	59
5	Závěr.....	61

## Seznam obrázků a tabulek

### Seznam obrázků

Obrázek 1: Adsorpce .....	16
Obrázek 2: Langmuirova a Freundlichova izoterma.....	18
Obrázek 3: Průřezové křivky – model [BALANAY 2021] .....	25
Obrázek 4: Průřez granulí aktivního uhlí.....	26
Obrázek 5: Schéma laboratorního zařízení pro měření adsorbce na ACF netkaných textiliích.....	33
Obrázek 6: Měřicí skleněné části potrubí.....	35
Obrázek 7: Měření tlakové ztráty pomocí digitálního diferenciálního tlakoměru Greisinger GDH 200-13 (vpravo) a U-trubice naplněné isopropanolem (vlevo).....	39
Obrázek 8: Typický záznam měření .....	42
Obrázek 9: Kalibrace PID typu AY na aceton .....	46
Obrázek 10: Adsorpční izoterma dusíku při 77 K .....	49
Obrázek 11: Rozložení objemů pórů ve vzorku B .....	50
Obrázek 12: Stanovení tlakových ztrát vzorků .....	52
Obrázek 13: Průběh adsorpce polárních látek na vzorku B při konstantní rychlosti proudění .....	53
Obrázek 14: Závislost adsorbovaného množství acetonu na vstupní koncentraci po 1 hodině adsorpce ..	54
Obrázek 15: Průběh adsorpce acetonu na vzorku B při konstantní koncentraci .....	55
Obrázek 16: Závislost adsorbovaného množství acetonu na počáteční koncentraci po 1 hodině adsorpce	56
Obrázek 17: Porovnání průběhu adsorpce toluenu na vzorcích A, B a C při koncentraci 50 ppm a rychlosti proudění 8 cm/s.....	57
Obrázek 18: Porovnání průběhu adsorpce toluenu na počtu vrstev vzorku B při koncentraci 50 ppm a rychlosti proudění 8 cm/s.....	58
Obrázek 19: Adsorpční účinnost vzorku B při různém počtu vrstev .....	59
Obrázek 20: Snímky SEM; a - vzorek A, 1 mm, b - vzorek B, 1 mm, c - vzorek C, 1 mm, d - vzorek B, 20 μm, .....	60

### Seznam tabulek

Tabulka 1: Kategorie kvality vzduchu z pohledu obsahu VOC.....	12
Tabulka 2: Porovnání fyzikální a chemické adsorpce.....	18
Tabulka 3: Přehled jednotlivých forem AC .....	28
Tabulka 4: Porovnání setupů pro testování ACF .....	32
Tabulka 5: Charakterizace vzorků ACF (bývá zvykem dávat nahoru). <b>Chyba! Záložka není definována.</b>	
Tabulka 6: Výsledky DTA/TG analýzy.....	51

## **Seznam zkratek**

ACF (activated carbon fibre) – vlákno z aktivního uhlí

VOC (volatile organic compound) – těkavá organická látka

AC (activated carbon) – aktivní uhlí

GAC (granulated activated carbon) – granulované aktivní uhlí

PAC (powered activated carbon) – práškové aktivní uhlí

SSA (specific surface area) – specifický povrch

PAN – polyakrylonitril

PID – fotoionizační detektor

DTA – diferenční termická analýza

TG (příp. TGA) – termogravimetrie (příp. termogravimetrická analýza)

VF (View Field) – zobrazované pole

## 1. Úvod

VOC (těkavé organické látky) jsou organické sloučeniny, které se při běžných podmínkách snadno vypařují do ovzduší. Tyto látky jsou často přítomny v domácnostech, kancelářských prostorech a dalších vnitřních prostředích, kde mohou pocházet z mnoha zdrojů, jako jsou stavební materiály, nábytek, čisticí prostředky, barvy, lepidla a různé spotřebiče. VOC mohou být v některých případech přítomny ve vzorcích vzduchu ve vyšších koncentracích než ve venkovním vzduchu, což představuje potenciální riziko pro zdraví a komfort obyvatel daných prostor [1].

Dlouhodobé vystavení těmto látkám může vést k respiračním problémům, podráždění očí, únavě a v některých případech přispívají dokonce k vážnějším zdravotním problémům, jako jsou neurologické poruchy nebo rakovina. S ohledem na rostoucí počet nových, vysoce izolovaných budov a zlepšující se těsnění je výměna vzduchu ve vnitřních prostorách stále častěji nedostatečná, což přispívá k akumulaci VOC v těchto prostředích [2].

Vzhledem k těmto problémům se stává odstranění VOC z vnitřního prostředí velmi důležitým tématem, a to jak z hlediska zdraví obyvatel, tak z hlediska zlepšení kvality vzduchu. Existuje několik metod pro eliminaci VOC, mezi které patří například zajištění dostatečné ventilace nebo aplikace adsorpčních materiálů [3].

Jednou z nejefektivnějších a nejběžněji využívaných metod je adsorpce, která využívá schopnosti některých materiálů zachytávat (absorbovat) VOC z proudu vzduchu. Tato metoda je obzvláště ceněná pro svou účinnost, relativní nízkou energetickou náročnost a jednoduchost implementace do existujících systémů.

Tato diplomová práce se zaměřuje na analýzu odstraňování VOC z vnitřního prostředí pomocí adsorpce na netkaných textiliích z ACF (vlákna z aktivního uhlí). Cílem je posoudit různé textilie, jejich účinnost při odstraňování VOC a jejich využití v praxi. V této práci jsou diskutovány principy adsorpce, různorodé materiály, které se v této metodě používají, a porovnání jejich výhod a nevýhod. Práce bude rovněž zahrnovat experimentální část, která se bude věnovat testování konkrétních adsorpčních materiálů na vyvinutém experimentální zařízení v laboratorních podmínkách.

## 2. Teoretická část

Teoretická část této práce se zaměřuje zejména na definici těkavých organických látek, jejich stanovení, jejich vliv na vnitřní prostředí a na adsorpci, zejména na aktivním uhlí.

### 2.1 Těkavé organické látky

Těkavé organické látky (VOC, z anglického *volatile organic compounds*) jsou organické sloučeniny, které se snadno odpařují do ovzduší při pokojové teplotě. Tyto látky jsou přítomné ve vnitřním prostředí a jejich koncentrace může být až několikanásobně vyšší než ve venkovním prostředí. VOC zahrnují širokou škálu chemických sloučenin, jako jsou formaldehyd, BTEX (benzen, toluen, ethylbenzen, xyleny) [4].

Hlavními zdroji VOC v interiérech jsou stavební materiály (např. barvy, laky, podlahové krytiny), nábytek z dřevotřísky, čisticí prostředky a kosmetika. Další významné emise pocházejí z domácích aktivit, jako je vaření nebo kouření [5,6]. Zvýšené koncentrace VOC mohou být způsobeny nedostatečným větráním nebo přehříváním interiérů, což urychluje jejich uvolňování [7].

#### 2.1.1 Vliv VOC na kvalitu vzduchu v interiéru

Těkavé organické látky (VOC) mají významný vliv na kvalitu vzduchu v uzavřených prostorech. Pro hodnocení jejich celkového množství se často používá ukazatel TVOC (*Total Volatile Organic Compounds*), který představuje souhrnnou koncentraci všech těkavých organických látek přítomných ve vzduchu [4; Weschler, 2009]. TVOC je běžně vyjadřován v jednotkách  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  nebo ppm (částic na milion). Převod mezi těmito jednotkami závisí na molární hmotnosti směsi VOC.

Pro průměrnou směs VOC platí:  $1 \text{ mg}/\text{m}^3 \approx 0,310 \text{ ppm}$  [5].

Podle Spolkového úřadu pro životní prostředí v Německu lze koncentrace TVOC kategorizovat dle tabulky 1

Tabulka 1: Kategorie kvality vzduchu z pohledu obsahu VOC

<b>Kvalita vzduchu</b>	<b>Rozsah (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Rozsah (ppm)</b>
Dobrá	0–1 000	0–0,31
Příjemná	1 000–2 000	0,31–0,62
Zhoršená	2 000–3 000	0,62–0,93
Špatná	>3 000	>0,93

Zvýšené koncentrace TVOC mohou být způsobeny nedostatečným větráním nebo vysokými teplotami, které urychlují uvolňování VOC z materiálů. Pravidelné měření a sledování těchto hodnot je proto klíčové pro udržení zdravého a komfortního prostředí, nicméně stejně důležitý je také kvalitativní rozbor, tedy zastoupení jednotlivých VOC. [4; 6].

### 2.1.2 Metody detekce a analýzy VOC

Detekce a analýza těkavých organických látek (VOC) je klíčová pro hodnocení kvality ovzduší v interiéru. K měření VOC se využívají různé analytické metody, které se liší svou citlivostí, přesností a vhodností pro konkrétní aplikace. Mezi nejčastěji používané techniky patří plynová chromatografie (GC), hmotnostní spektrometrie (MS), infračervená spektroskopie (IR) a přenosné senzory [4,5,7].

#### **Plynová chromatografie (GC)**

Plynová chromatografie je jednou z nejrozšířenějších metod pro analýzu VOC. Umožňuje separaci jednotlivých složek směsi na základě jejich fyzikálně-chemických vlastností. GC se často kombinuje s hmotnostní spektrometrií (GC-MS), která poskytuje vysokou citlivost a

schopnost identifikovat jednotlivé sloučeniny. Tato metoda je považována za zlatý standard pro kvantitativní i kvalitativní analýzu VOC [6; 8]. Pro vzorkování VOC se běžně využívají:

**Headspace analýza:** Separace těkavých látek z plynné fáze nad vzorkem.

**Purge-and-trap (P&T):** Proublávání inertního plynu skrz vzorek a zachycení VOC na adsorbentu [4].

### **Hmotnostní spektrometrie (MS)**

Hmotnostní spektrometrie je vysoce citlivá metoda, která umožňuje přesnou identifikaci VOC na základě jejich molekulové hmotnosti. V kombinaci s GC poskytuje detailní informace o složení vzorku a umožňuje kvantifikaci jednotlivých sloučenin. MS je obzvláště užitečná při sledování nízkých koncentrací VOC v interiéru [5; 8].

### **Infračervená spektroskopie (IR)**

Infračervená spektroskopie využívá absorpci infračerveného záření molekulami VOC k jejich identifikaci. Tato metoda je rychlá a neinvazivní, ale méně citlivá než GC-MS. Používá se zejména pro kontinuální monitorování kvality vzduchu v reálném čase [Weschler, 2009].

### **Přenosné senzory**

Pro praktické monitorování VOC v reálném čase se stále častěji používají přenosné senzory založené na fotoionizační detekci (PID). Tyto senzory poskytují rychlé výsledky a jsou vhodné pro screeningové měření, ale mají nižší selektivitu než laboratorní metody [6,8].

### **Normy a standardy**

Měření VOC je často prováděno podle mezinárodních norem, jako je ISO 16000-6, která specifikuje metody odběru vzorků a analýzy VOC v interiéru pomocí GC-MS. Tyto normy zajišťují konzistenci výsledků a umožňují porovnání dat mezi různými studiemi [5].

### 2.1.3 Zdravotní dopady expozice VOC

Expozice těkavým organickým látkám (VOC) v interiéru může mít významné zdravotní důsledky, které se liší podle koncentrace, délky expozice a individuální citlivosti. VOC jsou přítomny v mnoha běžných materiálech a produktech v domácnostech, jako jsou stavební materiály, nábytek nebo čisticí prostředky. V uzavřených prostorech mohou být jejich koncentrace až několikanásobně vyšší než ve venkovním prostředí, což zvyšuje riziko negativních účinků na zdraví [6,9].

#### **Akutní účinky**

Krátkodobá expozice vysokým koncentracím VOC může způsobit řadu nepříjemných příznaků. Mezi nejčastější patří:

Podráždění očí, nosu a krku: VOC, jako je formaldehyd nebo toluen, mohou způsobovat záněty sliznic a nepříjemné pocity pálení.

Bolesti hlavy, únava a závratě: Tyto symptomy jsou často spojovány s přítomností benzenových derivátů ve vzduchu.

**Nevolnost:** Některé VOC mohou mít dráždivé účinky na zažívací systém při inhalaci [8].

Tyto akutní symptomy jsou často spojovány se syndromem nemocných budov (*Sick Building Syndrome*), který je charakterizován nepříjemnými zdravotními příznaky spojenými s pobytem v uzavřených prostorech. Tento syndrom je běžný v kancelářských budovách nebo školách s nedostatečným větráním [9].

#### **Chronické účinky**

Dlouhodobá expozice nízkým koncentracím VOC může vést k vážnějším zdravotním problémům:

Respirační onemocnění: VOC, jako je formaldehyd nebo benzen, mohou zhoršovat astma a způsobovat chronickou bronchitidu. Studie ukazují, že dlouhodobé vystavení formaldehydu může vést k přetrvávajícímu poškození dýchacích cest [5].

Alergické reakce: Některé VOC mohou vyvolávat alergie nebo senzibilizaci imunitního systému. Například styren a xyleny jsou známé svými alergenními vlastnostmi.

Karcinogenita: Benzen je klasifikován jako karcinogen skupiny 1 podle Mezinárodní agentury pro výzkum rakoviny (IARC). Dlouhodobá expozice benzenovým derivátům je spojována se zvýšeným rizikem leukémie [10].

### **Rizikové skupiny**

Zvláštní pozornost je třeba věnovat citlivým skupinám obyvatel:

Děti: Vzhledem k vyšší míře dýchání na jednotku tělesné hmotnosti jsou děti více ohroženy negativními účinky VOC. Vývoj jejich imunitního systému a dýchacích cest může být narušen dlouhodobou expozicí.

Senioři: Starší osoby mají často oslabený imunitní systém a jsou náchylnější k respiračním onemocněním.

Osoby s chronickými nemocemi: Jedinci s astmatem nebo alergiemi mohou být zvláště citliví na přítomnost VOC v interiéru [6,9].

### **Mechanismy působení**

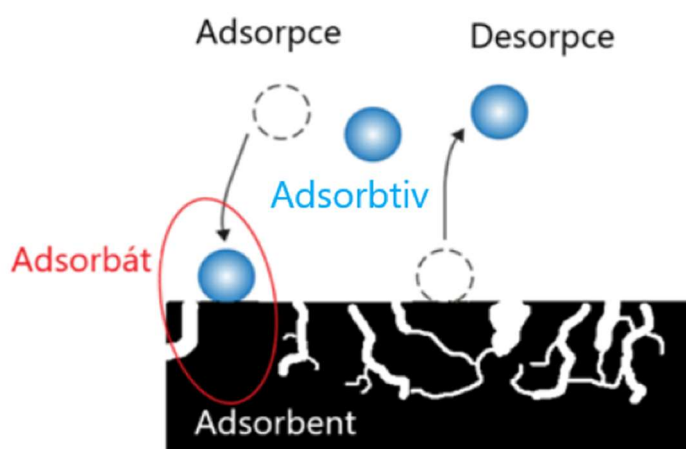
VOC ovlivňují lidské zdraví několika mechanismy:

- Dráždivé účinky na sliznice dýchacích cest.
- Oxidační stres způsobený některými reaktivními sloučeninami.
- Senzibilizace imunitního systému vedoucí k alergickým reakcím [8].

Pravidelné monitorování koncentrací VOC v interiéru a používání materiálů s nízkými emisemi VOC může významně snížit riziko negativních zdravotních dopadů.

## 2.2 Adsorpce

Adsorpce je proces, při kterém dochází k hromadění atomů nebo molekul látky (adsorbátu) na povrchu jiné látky (adsorbentu) vlivem mezimolekulových přitažlivých sil (obrázek 1). Tento jev je klíčový v mnoha průmyslových a vědeckých aplikacích, jako je čištění vody, separace plynů, katalýza nebo farmaceutická výroba. Adsorpce se dělí na dva hlavní typy: fyzikální adsorpci a chemisorpci, které se liší povahou vazeb mezi adsorbátem a adsorbentem. Opačnou operací k adsorpci je desorpce [11].



Obrázek 1: Adsorpce

### 2.2.1 Fyzikální adsorpce

Fyzikální adsorpce, někdy označovaná jako fyzisorpce nebo Van der Waalsova adsorpce, je proces, při kterém jsou molekuly adsorbátu poutány na povrch adsorbentu slabými mezimolekulovými silami. Tyto síly jsou nechemické povahy a zahrnují Van der Waalsovy přitažlivé síly. Fyzikální adsorpce je charakteristická svou reverzibilitou – změnou podmínek, jako je zvýšení teploty nebo snížení tlaku, lze adsorbované molekuly snadno uvolnit zpět do okolního prostředí. Porovnání těchto typů adsorpce je uvedeno v tabulce 2 [12].

#### Vlastnosti fyzisorpce

- Slabé interakce: Vazba mezi adsorbentem a adsorbátem je poměrně slabá, což znamená, že nedochází ke změně chemické povahy adsorbovaných molekul.

- Nízké teploty: Fyzikální adsorpce probíhá lépe při nízkých teplotách, protože zvýšení teploty zvyšuje kinetickou energii molekul a snižuje pravděpodobnost jejich setrvání na povrchu.
- Multivrstvá adsorpce: Adsorbát se může usazovat ve více vrstvách na povrchu adsorbentu, protože interakce mezi molekulami mohou být silnější než interakce s povrchem.

Fyzikální adsorpce nachází široké uplatnění například při separaci plynů, skladování vodíku nebo odstraňování kontaminantů z vody pomocí aktivního uhlí [13].

### 2.2.2 Chemisorpce

Chemisorpce je proces, při kterém dochází k vytvoření chemických vazeb mezi molekulami adsorbátu a povrchem adsorbentu. Na rozdíl od fyzikální adsorpce je chemisorpce pevnější a často nevratná. Tento proces zahrnuje sdílení nebo výměnu elektronů mezi povrchem a molekulami, což znamená, že chemická povaha adsorbovaných látek se mění [14].

#### **Vlastnosti chemisorpce**

- Silné vazby: Chemisorpční vazby jsou mnohem silnější, než Van der Waalovy síly. Typicky jde o kovalentní nebo iontové vazby.
- Aktivace: Chemisorpce často vyžaduje dodání aktivační energie (např. zahřátí), aby došlo k vytvoření chemické vazby.
- Monovrstvá adsorpce: Na rozdíl od fyzikální adsorpce se chemisorpce omezuje na vytvoření jediné vrstvy molekul na povrchu.
- Teplotní závislost: Chemisorpce probíhá lépe při vyšších teplotách, protože vyšší energie podporuje překonání aktivační bariéry.

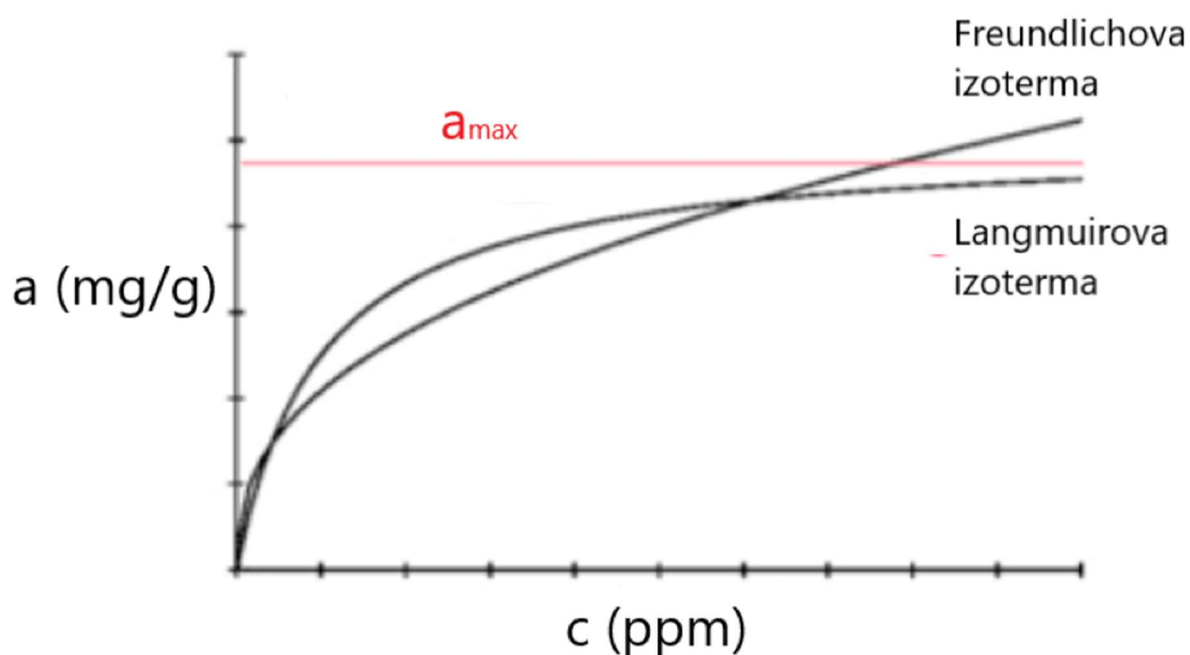
Chemisorpce se často využívá v katalýze (například heterogenní katalýza), kde aktivní místa na povrchu katalyzátoru umožňují chemickou reakci mezi reaktanty. Další aplikace zahrnují skladování plynů nebo senzory pro detekci specifických látek [11].

Tabulka 2: Porovnání fyzikální a chemické adsorpce

Vlastnost	Fyzikální adsorpce	Chemisorpce
Vazebné síly	Van der Waalsovy síly	Chemické vazby (kovalentní/iontové)
Reverzibilita	Reverzibilní	Obvykle nevratná
Počet vrstev	Více vrstev	Jedna vrstva
Teplota	Lepší při nízkých teplotách	Lepší při vyšších teplotách
Energie vazby	Nízká	Vysoká
Změna chemické povahy	Ne	Ano

### 2.2.3 Adsorpční rovnováha

Adsorpční rovnováha popisuje vztah mezi množstvím adsorbované látky a koncentrací nebo tlakem adsorptivu při konstantní teplotě. Nejčastěji se využívají dva hlavní modely: Langmuirova a Freundlichova izoterma, jejichž modelové grafické znázornění je na obrázku 2.



Obrázek 2: Langmuirova a Freundlichova izoterma

### Langmuirova izoterma

Předpokládá omezený počet stejnorodých adsorpčních míst a monovrstvu adsorbátu a lze ji vyjádřit vztahem:

*Rovnice 1: Langmuirova izoterma*

$$a = \frac{a_{max} \cdot k_L \cdot p_i}{1 + k_L \cdot p_i} \quad (1)$$

kde  $a$  je množství adsorbované látky,  $a_{max}$  maximální kapacita,  $k_L$  rovnovážná konstanta a  $p_i$  je parciální tlak adsorbovatelné látky [15].

### Freundlichova izoterma

Popisuje heterogenní povrch s různými energiemi adsorpčních míst.

*Rovnice 2: Freundlichova izoterma*

$$a = K \cdot p_i^{1/n} \quad (2)$$

kde  $a$  je množství adsorbované látky,  $p_i$  je parciální tlak adsorbovatelné látky,  $K$  a  $n$  jsou empirické konstanty [16].

### Faktory ovlivňující adsorpci

Adsorpci ovlivňuje řada faktorů:

Teplota: Vyšší teplota snižuje fyzikální adsorpci (exotermický proces), ale může zvýšit chemisorpci [14].

Plocha povrchu: Větší specifický povrch zvyšuje účinnost [12].

Koncentrace adsorptivu (adsorbované látky): Vyšší koncentrace podporuje větší množství zachyceného materiálu [11].

pH prostředí: Ovlivňuje elektrostatické interakce mezi částicemi [13].

## 2.2.4 Využití adsorpce

Adsorpce je jedním z nejdůležitějších procesů používaných v průmyslu, ochraně životního prostředí, zdravotnictví a dalších oblastech. Díky schopnosti adsorbentů selektivně zachytávat

látky z plynů nebo kapalin se tento proces uplatňuje v široké škále aplikací. Níže jsou uvedeny hlavní oblasti využití adsorpce.

### **Čištění vody**

Adsorpce se hojně využívá při úpravě pitné vody i čištění odpadních vod. Aktivní uhlí je zde nejčastěji používaným adsorbentem díky své schopnosti odstraňovat širokou škálu kontaminantů:

Organické látky: Pesticidy, herbicidy a zbytky léčiv.

Těžké kovy: Rtuť, olovo nebo kadmium.

GAC (Granulované aktivní uhlí) se používá v kontinuálních filtrech, zatímco PAC (práškové aktivní uhlí) se aplikuje při jednorázových zásazích, například při havarijním znečištění vody [13].

### **Separace plynů**

Adsorpční technologie umožňují separaci složek plynných směsí na základě rozdílů v jejich afinitě k povrchu adsorbentu. Typickými aplikacemi jsou:

Výroba medicínálního kyslíku: Oddělení kyslíku od dusíku pomocí zeolitových molekulárních sít.

Izolace vodíku: Získávání vodíku ze syntézního plynu v petrochemickém průmyslu.

Zeolity a aktivní uhlí jsou běžně používané adsorbenty díky své selektivitě k určitým molekulám [11].

### **Katalýza**

V heterogenní katalýze hraje adsorpce klíčovou roli při aktivaci reaktantů na povrchu katalyzátoru. Chemisorpce umožňuje vytvoření silných vazeb mezi molekulami reaktantů a katalyzátorem, což usnadňuje chemické reakce. Příklady zahrnují: výrobu amoniaku Haber-Boschovou syntézou nebo hydrogenační reakce v petrochemickém průmyslu [14].

### **Potravinářství a farmaceutický průmysl**

Adsorpce se využívá i ve výrobě potravin a léčiv:

Potravinářství: Odbarvování cukru pomocí aktivního uhlí nebo odstraňování pryskyřic z rostlinných olejů.

Farmaceutický průmysl: Izolace antibiotik, vitamínů nebo aromatických látek z fermentačních roztoků [13].

### **Odstraňování pachů a toxických plynů**

Adsorpční procesy se často využívají k odstranění nepříjemných pachů a toxických plynů z ovzduší:

Pachy: Aktivní uhlí zachycuje zapáchající látky v klimatizačních systémech nebo čističkách vzduchu.

Toxické plyny: Zachycování sirovodíku ( $\text{H}_2\text{S}$ ), oxidu siřičitého ( $\text{SO}_2$ ) nebo amoniaku ( $\text{NH}_3$ ) z průmyslových emisí.

### **Odstraňování VOC ze vzduchu**

VOC jsou zachycovány na povrchu adsorbentů, jako je aktivní uhlí nebo zeolity, díky jejich velké specifické ploše a vysoké afinitě k organickým látkám.

Kontaminovaný vzduch prochází přes adsorbent, kde se VOC vážou na jeho povrch. Po nasycení adsorbentu lze provést regeneraci pomocí desorpce (zahřátím, vakuem nebo proplachem inertním plynem).

Praktické využití:

Průmyslové aplikace: Odstraňování VOC z emisí vznikajících při výrobě barev, rozpouštědel, chemikálií nebo při tisku.

Vnitřní prostředí: Čištění vzduchu v kancelářích, nemocnicích nebo domácnostech pomocí filtračních systémů s aktivním uhlím.

Mezi přední výhody použití adsorpce při odstraňování VOC patří:

- vysoká účinnost při nízkých koncentracích VOC v ovzduší.
- možnost regenerace adsorbentu a opakovaného použití.
- ekologická šetrnost při správné likvidaci nasyceného adsorbentu [13,17].

## 2.2.5 Vlastnosti adsorbentů

Adsorbenty jsou materiály, které mají schopnost vázat molekuly látek (adsorbentu) na svém povrchu. Jejich vlastnosti zásadně ovlivňují účinnost a selektivitu adsorpčního procesu.

### **Klíčové vlastnosti adsorbentů**

#### **Specifický povrch (SSA)**

Celková plocha povrchu adsorbentu vztažená na jednotku hmotnosti ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) se označuje jako specifický povrch. Význam hodnoty tohoto parametru je klíčový, protože kvantifikuje počet adsorpčních míst, která jsou k dispozici pro interakci s molekulami adsorbované látky. Vysoký SSA vede k vyšší adsorpční kapacitě.

#### **Velikost a distribuce pórů**

Pórovitost adsorbentu se dělí na mikropóry (<2 nm), mezopóry (2-50 nm) a makropóry (>50 nm). Distribuce velikosti pórů udává, jaký podíl objemu pórů tvoří póry různých velikostí. Velikost pórů musí být vhodná pro molekuly adsorbátu. Mikropóry jsou ideální pro adsorpci malých molekul, zatímco mezopóry usnadňují difúzi a přístup k adsorpčním místům.

Měření: Adsorpce-desorpce plynů (např. dusíku) a analýza izoterem (BET)

#### **Specifický objem pórů**

Specifický objem pórů je celkový objem pórů v adsorbentu vztažený na jednotku hmotnosti ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ). Stejně jako u SSA, objem pórů kvantifikuje množství adsorbované látky, které je adsorbent schopen pojmout a je tedy limitujícím faktorem pro určení adsorpční kapacity adsorbentu.

### **Chemické složení a povrchová chemie**

Chemické složení povrchu adsorbentu a přítomnost funkčních skupin (např. - OH, - COOH, - NH<sub>2</sub>) ovlivňují jeho interakce s adsorbovanou látkou. Povrchová chemie určuje, zda bude adsorbent preferovat adsorpci polárních nebo nepolárních látek. Modifikací povrchu lze dosáhnout specifické selektivity.

Měření: Rentgenová fotoelektronová spektroskopie (XPS), infračervená spektroskopie (FTIR).

### **Mechanická stabilita**

Odolnost adsorbentu vůči mechanickému opotřebení (drcení, abrazi) během používání. Tento parametr je důležitý v případech, kdy je adsorbent vystaven mechanickému namáhání (např. ve fluidních ložích).

### **Tepelná stabilita**

Odolnost adsorbentu vůči změnám vlastností při zvýšených teplotách se označuje pojmem tepelná stabilita. Je to také důležitý parametr pro regeneraci adsorbentu termickou desorpcí a pro aplikace v prostředí s vysokými teplotami.

### **Hydrofobita/Hydrofilita**

Míra afinity povrchu adsorbentu k vodě. Hydrofobní adsorbenty preferují adsorpci nepolárních látek, zatímco hydrofilní adsorbenty preferují adsorpci polárních látek a vody.

## 2.2.6 Typické příklady adsorbentů

### **Zeolity**

Zeolity jsou krystalické hydratované hlinitokřemičitany s pravidelnou strukturou pórů a kanálků, které se vyrábí hydrotermální syntézou.

Mezi vlastnosti zeolitů patří bezpochyby jejich definovaná a uniformní velikost pórů, což umožňuje jejich využití jako molekulární síta, vysoká selektivita k určitým molekulám na

základě jejich velikosti a polariry, tepelná a chemická stabilita a možnost výměny iontů. Zeolity nacházejí využití při separaci plynů, sušení, katalýze a iontové výměně [18].

### **Silikagel**

Silikagel je amorfni forma oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ) a vyrábí se reakcí alkalických silikátů s kyselinami.

Silikagel disponuje vysokým specifickým povrchem (200-800  $\text{m}^2/\text{g}$ ) a z hlediska velikosti jeho pórů se jedná převážně o mezopóry. Hydrofilní povrch (díky přítomnosti silanolových skupin  $-\text{SiOH}$ ) zajišťuje schopnost na svém povrchu dobře adsorbovat vodu a polární látky. Výhodou je také relativně nízká cena. Silikagel tedy najde své využití při sušení, dehydrataci nebo adsorpci polárních látek [19].

### **Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )**

Oxid hlinitý s různými krystalickými formami ( $\alpha, \gamma, \eta, \theta$ ) se vyrábí termickým rozkladem hydroxidu hlinitého.

Mezi vlastnosti aluminy patří specifický povrch 50-400  $\text{m}^2/\text{g}$ . Stejně jako silikagel obsahuje převážně mezopóry. Amfoterní povrch (může vykazovat kyselé i bazické vlastnosti), tepelná a chemická stabilita. Své využití najde při adsorpci polárních látek, katalýze jako katalyzátor nebo nosič katalyzátorů.

### **Aktivní uhlí (AC)**

Aktivní uhlí a jeho problematika jsou diskutovány v samostatné kapitole 2.3, jakožto klíčový materiál, pro vznik této práce.

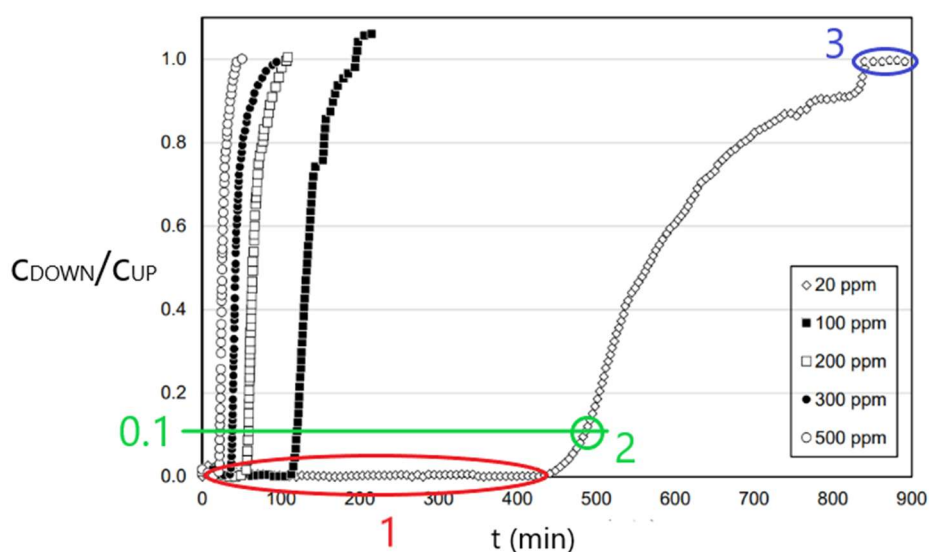
## **2.2.7 Vyhodnocení dynamické rovnováhy adsorpce**

Dynamická rovnováha v kontextu adsorpce je stav, kdy rychlost adsorpce molekul na povrch adsorbentu je rovna rychlosti desorpce molekul zpět do okolního prostředí. Tento stav je ovlivněn fyzikálními a chemickými vlastnostmi adsorbentu, vlastnostmi adsorbované látky a provozními podmínkami, kterými jsou zejména teplota, vlhkost a tlak [11].

## Průrazové křivky

Průrazové křivky jsou klíčovým nástrojem pro analýzu dynamické rovnováhy při adsorpci plynů nebo par na adsorbentu. Tyto křivky popisují závislost výstupní koncentrace sledované látky na čase a poskytují důležité informace o účinnosti a životnosti adsorbčních materiálů.

Na obrázku 3 [BALANAY 2021] jsou znázorněny průrazové křivky jako závislost koncentrace sledované látky, po průchodu adsorbentem (Downstream) jako procento její vstupní koncentrace, čili koncentrace před průchodem adsorbentem (Upstream) na čase.



Obrázek 3: Průrazové křivky – model [BALANAY 2021]

## Fáze průrazové křivky

1. Počáteční fáze: Koncentrace na výstupu je nulová, protože adsorbent efektivně zachycuje látku.
2. Průrazový bod: Koncentrace na výstupu dosahuje určité hodnoty (např. 10 % vstupní koncentrace), což signalizuje snížení účinnosti adsorbentu.
3. Saturační fáze: Adsorbent dosáhne své maximální kapacity a výstupní koncentrace se rovná vstupní.

## 2.3 Aktivní uhlí

Aktivní uhlí je jedním z nejstarších známých adsorpčních materiálů. Díky své porézní struktuře a schopnosti adsorbovat široké spektrum látek se jeho využití rozšířilo do mnoha oblastí lidské činnosti, od medicíny po průmysl. Tato kapitola shrnuje jeho historii, výrobu, typy a aplikace.

### 2.3.1 Distribuce pórů a afinita aktivního uhlí

Aktivní uhlí má komplexní porézní strukturu, která je klíčová pro jeho adsorpční vlastnosti. Na obrázku 4 je znázorněna mikroporézní struktura aktivního uhlí.



Obrázek 4: Průřez granulí aktivního uhlí

Mikropóry tvoří 90–95 % celkového povrchu aktivního uhlí. Jsou klíčové pro adsorpci malých molekul, jako jsou VOC a pesticidy. Struktura mikropórů je často klínovitá nebo štěrbinová, což zvyšuje jejich účinnost při zachytávání polutantů [20].

Mezopóry slouží jako transportní kanály pro molekuly směrem k mikropórům. Jsou důležité pro adsorpci větších molekul, například některých proteinů nebo přírodních organických látek [21].

Distribuce těchto pórů závisí na výchozím materiálu a způsobu aktivace. Například aktivní uhlí vyrobené z kokosových skořápek má vysoký podíl mikropórů, zatímco uhlí z dřeva obsahuje více mezopórů, než v případě uhlí vyrobeného z kokosových skořápek [22,23].

Aktivní uhlí má hydrofobní povrch, což zvyšuje jeho schopnost adsorbovat nepolární organické látky, jako jsou VOC, benzínové složky nebo pesticidy. Van der Waalsovy síly hrají klíčovou roli při adsorpci nepolárních molekul na povrch uhlí [23]. Polární molekuly mají nižší tendenci

být adsorbovány na hydrofobní povrch aktivního uhlí. Výjimkou jsou polární látky s vysokou aromaticitou nebo funkčními skupinami schopnými interagovat s kyslíkatými skupinami na povrchu aktivního uhlí [24]. Aktivní uhlí má také nízkou afinitu k vodě kvůli své hydrofobní povaze. Při styku s vodou však může povrch aktivního uhlí získat polární charakter díky přítomnosti kyslíkatých funkčních skupin (např. karbonylových nebo hydroxylových), což umožňuje adsorpci některých iontů nebo kovů [25].

### 2.3.2 Historie používání aktivního uhlí

Starověk: Aktivní uhlí bylo známo již starověkým civilizacím. Egypťané jej používali k čištění ran a balzamování mrtvých, zatímco Hippokrates doporučoval jeho užívání k detoxikaci organismu [23].

18. a 19. století: V roce 1785 Karl Wilhelm Scheele popsal schopnost aktivního uhlí adsorbovat plyny, což vedlo k jeho vědeckému zkoumání. Aktivní uhlí se začalo používat v cukrovarnictví k odbarvování sirupů a při výrobě alkoholu [24].

20. století: Během první světové války bylo aktivní uhlí klíčovým materiálem v plynových maskách, které chránily vojáky před toxickými plyny. Po válce se jeho použití rozšířilo na filtraci vody, regeneraci rozpouštědel a čištění vzduchu [25].

### 2.3.3 Výroba a formy aktivního uhlí

Proces výroby zahrnuje dvě klíčové fáze. První fází je karbonizace, při které je surovina (např. kokosové skořápky) zahřívána na teplotu 600–900 °C v prostředí s nízkým obsahem kyslíku. Druhou fází je aktivace, kdy je materiál vystaven působení plynů nebo chemikálií při teplotách až 1000 °C, což vede ke vzniku mikropórů s obrovskou povrchovou plochou (400–1500 m<sup>2</sup>/g) [26].

Aktivní uhlí se vyrábí z různých uhlíkatých materiálů a jeho typy se liší velikostí částic, pórovitostí a specifickými aplikacemi. Níže jsou podrobně popsány tři hlavní typy: PAC, GAC a textilie na bázi ACF. Každý typ má své unikátní vlastnosti, výrobu a oblasti použití, které jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Přehled jednotlivých forem AC

Forma AC	Specifický povrch (m <sup>2</sup> /g)	Schopnost regenerace	Velikost částic
PAC	Až 1500	Nízká	Pod 0,18 mm
GAC	Až 1200	Vysoká	1–4 mm
Textilie na bázi ACF	Přes 1000	Střední	Mikrovlákna

### **Práškové aktivní uhlí (PAC)**

PAC se vyrábí karbonizací surovin bohatých na uhlík (např. kokosové skořápky nebo dřevo) při teplotách 600–900 °C. Následně dochází k aktivaci vodní parou nebo chemickými činidly. Po aktivaci je materiál mlet na velmi jemný prášek o velikosti částic 10–50 µm [26].

Mezi vlastnosti PAC spadá vysoký specifický povrch (až 1500 m<sup>2</sup>/g), rychlá adsorpce díky malé velikosti částic. PAC je nevhodné pro regeneraci kvůli obtížné manipulaci a nízké mechanické pevnosti.

PAC najde své uplatnění převážně při odstraňování organických znečišťujících látek z vody, jako jsou pesticidy a VOC nebo v průmyslových procesech, kde je potřeba jednorázová adsorpce [23,27].

### **Granulované aktivní uhlí (GAC)**

GAC je vyráběno lisováním surovin do granulí o velikosti 1–4 mm. Poté následuje karbonizace a aktivace vodní parou při teplotách až 1000 °C. Výsledkem je materiál s vysokou mechanickou pevností a odolností proti otěru [23].

Vlastnostmi GAC je specifický povrch až 1200 m<sup>2</sup>/g, nižší než u PAC. Větší částice umožňují větší mezerovitost, tedy nižší tlakové ztráty při průchodu vzduchu nebo kapaliny. Další výhodou oproti PAC je snadná regenerace díky větší velikosti částic.

Využívá se v tlakových filtrech pro úpravu pitné vody, odstraňování chlóru, pesticidů a organických mikropolutantů. Vhodné pro dlouhodobé aplikace díky možnosti regenerace [28].

### **Textilie na bázi mikrovláknenného aktivního uhlí (ACF)**

Textilie na bázi ACF představují inovativní materiál s vysokou adsorpční kapacitou a širokým spektrem aplikací. Díky jejich vláknenné struktuře a velkému specifickému povrchu jsou ideální pro aplikace v průmyslu, zdravotnictví a ekologii.

ACF textilie se vyrábějí z vláknitých prekurzorů, jako je polyakrylonitril (PAN), viskóza nebo přírodní vlákna, pomocí karbonizace, kdy vlákna jsou zahřívána v inertní atmosféře (např. dusík) při teplotách 600–800 °C. Tento proces odstraňuje neuhlíkaté složky.

Následuje aktivace, při níž je materiál vystaven vodní páře nebo oxidačním plynům při teplotách 800–1000 °C. Tím vznikají mikropóry o průměru 1–2 nm, které zajišťují vysokou adsorpční kapacitu. Posledním krokem je zpracování do netkaných textilií, lze je případně zpracovat i do forem, jako jsou plsti nebo papír [28].

Textilie na bázi ACF mají specifický povrch více než 1000 m<sup>2</sup>/g (liší se u konkrétních výrobků). Většinu struktury tvoří mikropóry, což umožňuje adsorpci malých molekul. Lze je snadno tvarovat do různých forem a přizpůsobit konkrétním aplikacím. A díky vláknenné struktuře jsou lehčí než GAC.

ACF textilie se používají pro odstranění těkavých organických látek (VOC), pachů a škodlivých plynů ze vzduchu, své využití najdou tedy jako čističky vzduchu, nebo v automobilovém průmyslu jako filtry v kabinách vozidel chrání pasažéry před škodlivými látkami z výfukových plynů [29]. Textilie s ACF lze použít na skládkách odpadu nebo kompostárnách rovněž k eliminaci nepříjemných pachů [26].

ACF textilie jsou také klíčovým materiálem pro výrobu ochranných prostředků jako jsou ochranné oděvy v chemickém průmyslu nebo v armádě k ochraně před toxickými plyny a jako filtry pro plynové masky: efektivně adsorbují toxické látky, jako je amoniak nebo chlor [23].

#### **Porovnání s jinými typy aktivního uhlí**

Ve srovnání s práškovým (PAC) nebo granulovaným aktivním uhlím (GAC) mají textilie na bázi ACF několik výhod, mezi které bezpochyby patří rychlejší adsorpce díky přímému přístupu molekul k mikropórům, jejich flexibilita, která umožňuje jejich použití v různých tvarech a aplikacích a nižší tlakové ztráty při použití ve filtrech.

### 2.3.4 Mechanismus adsorpce na AC

Adsorpce probíhá díky porézní struktuře aktivního uhlí. Molekuly VOC nebo jiných látek difundují do mikropórů sorbentu, kde se vážou na povrch prostřednictvím van der Waalsových sil nebo chemických vazeb [23].

### 2.3.5 Aplikace aktivního uhlí

Průmysl: Filtrace vody a vzduchu, odstraňování těkavých organických látek (VOC), výroba potravin a nápojů.

Medicína: Detoxikace organismu, léčba zažívacích potíží, protijed při otravách.

Ekologie: Čištění odpadních vod a ochrana ovzduší před emisemi škodlivých látek.

### 2.3.6 Regenerace aktivního uhlí

Regenerace aktivního uhlí je proces obnovy jeho adsorpční kapacity po vyčerpání. Tento proces je klíčový pro snížení nákladů a environmentální zátěže spojené s likvidací použitého uhlí. Existuje několik metod regenerace, z nichž nejvýznamnější jsou:

- termická reaktivace,
- chemická regenerace,
- regenerace pomocí přehřáté páry
- inovativní metody jako mikrovlnná regenerace.

#### **Termická reaktivace**

Termická reaktivace je nejrozšířenější metodou regenerace aktivního uhlí. Probíhá při vysokých teplotách (600–900 °C) za přítomnosti vodní páry nebo inertních plynů.

Proces zahrnuje několik fází. V prvním kroku dochází k sušení, tedy k odstranění vody při teplotách 100–150 °C. Druhou fází je karbonizace, při níž se rozkládají organické látky při teplotách 300–700 °C, s ohledem na typ těchto látek. Posledním krokem je oxidace zbytkových uhlíkatých depozit při teplotách kolem 800 °C.

Výzkumy ukazují, že správné nastavení teplotního režimu může minimalizovat ztrátu materiálu a zachovat účinnost uhlí.

### **Chemická regenerace**

Chemická regenerace využívá chemických látek, jako jsou hydroxid sodný nebo kyseliny, k odstranění adsorbovaných kontaminantů. Tato metoda je méně účinná než termická reaktivace, zejména při obnově kapacity mikropórů [24]. Je však vhodná pro specifické aplikace, například při odstraňování VOC.

### **Mikrovlnná regenerace**

Mikrovlnná regenerace představuje inovativní přístup využívající mikrovlnné záření k zahřívání aktivního uhlí. Tato metoda umožňuje rychlé a rovnoměrné zahřívání, což vede k efektivní desorpci organických látek. Mikrovlnná regenerace může být účinnou alternativou k tradičním metodám díky nižšímu energetickému zatížení.

### **Regenerace vodní párou**

Regenerace vodní párou probíhá při teplotách 300–350 °C a je šetrnější k materiálu než termická reaktivace. Tato metoda se často používá u filtrů na čištění vzduchu a vody. Adsorbované látky jsou desorbovány a následně kondenzovány.

### **Ekonomické a environmentální aspekty**

Regenerace aktivního uhlí je ekonomicky výhodnější než jeho likvidace a náhrada novým materiálem. Například ve vodárenských zařízeních může reaktivované uhlí snížit náklady až o 50 % oproti použití nového uhlí [24]. Environmentální přínosy zahrnují snížení odpadu a emisí spojených s výrobou nového uhlí.

### **Výzvy a inovace**

Jednou z hlavních výzev regenerace je zachování sorpční kapacity bez významných ztrát materiálu. Moderní technologie, jako jsou kombinované cykly středně teplotní regenerace a mikrovlnné metody, umožňují optimalizaci procesu pro různé typy kontaminantů. Další

výzkumy se zaměřují na využití fotokatalytických technologií pro regeneraci bez produkce vedlejších odpadů.

### 2.3.7 Přehled metodologie testování ACF

Níže je uvedeno shrnutí a porovnání tří literárních zdrojů, které se zabývají testováním adsorpčních vlastností aktivních uhlíkových vláken (ACF) při zachytávání těkavých organických látek (VOC). Dva články popisují využití injekční stříkačky naplněné VOC pro generování VOC ve vstupním proudu do testovacího zařízení [30,31], zatímco třetí článek popisuje použití promývačky naplněné těkavou organickou látkou pro generování VOC ve vstupním proudu [32].

Tabulka 4: Porovnání setupů pro testování ACF

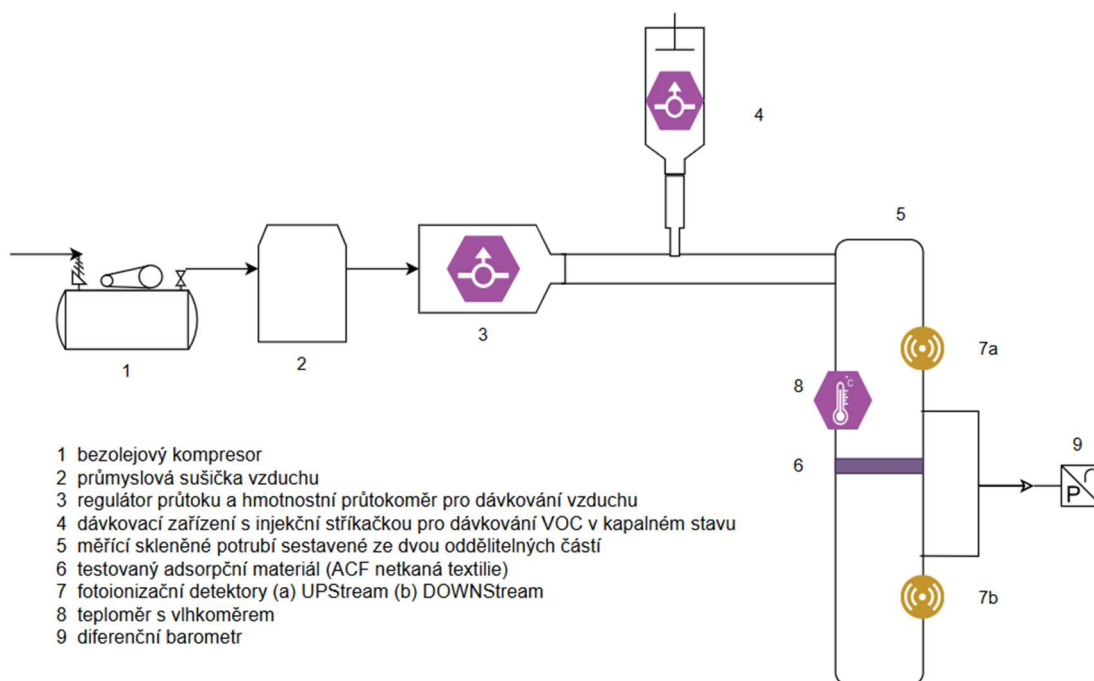
Kritérium	Balanay et al. (2021)	Summers (2022)	Zhang et al. (2020)
Testovací zařízení	Respirátorové kazety s ACF	Vrstvy ACF	ACF umístěna do proudu plynu,
Detektor	Fotoionizační detektor (PID)		
Generace par	Dávkování kapalné VOC injekční stříkačkou		Probublávání dusíku skrze promývačku s VOC
Rozmezí koncentrací	20–500 ppm	200 ppm	100–400 ppm

### 3 Experimentální část

Experimentální část se zaměřuje na testování účinnosti adsorpce těkavých organických látek (VOC) z vnitřního prostředí pomocí adsorpčních uhlíkových textilií (ACF). Pro realizaci experimentů bylo vyvinuto a sestaveno vlastní laboratorní zařízení, které umožňuje přesné měření adsorpčních vlastností materiálů. K charakterizaci použitých ACF textilií byly využity analytické metody, jako jsou BET analýza, elektronová mikroskopie (SEM), DTA/TG analýza a měření tlakových ztrát.

#### 3.1 Laboratorní zařízení pro testování účinnosti adsorpce

Na obr. 5 je znázorněno schéma vyvinutého zařízení pro měření účinnosti adsorbce na ACF netkaných textiliích.



Obrázek 5: Schéma laboratorního zařízení pro měření adsorbce na ACF netkaných textiliích

**Podrobnější popis jednotlivých částí zařízení je uveden v následujícím textu**

#### **1. Bezolejový kompresor**

Zajišťuje přívod stlačeného vzduchu (3 atm) do systému. Použití bezolejového kompresoru eliminuje riziko kontaminace vzduchu olejovými částicemi.

#### **2. Průmyslová sušička vzduchu**

Odstraňuje vlhkost ze stlačeného vzduchu, čímž zajišťuje suchý vzduch vhodný pro experimenty. Výsledná relativní vlhkost ve zbytku systému je 4-6 % při teplotě  $23 \pm 1$  °C.

#### **3. Hmotnostní průtokoměr pro dávkování vzduchu**

Pro přesné nastavení a kontrolu průtoku vzduchu byl použit hmotnostní průtokoměr EL-FLOW Base od společnosti Bronkhorst. Tento model umožňuje regulaci průtoku v rozsahu 0–25 l/min, což je ideální pro laboratorní aplikace vyžadující stabilní podmínky. Přesnost dávkování je specifikována jako  $\pm 0,5$  % z měřené hodnoty a  $\pm 0,1$  % z maximálního rozsahu, což zajišťuje vysokou spolehlivost při nastavování požadovaných průtoků [33].

#### **4. Dávkovací zařízení s injekční stříkačkou pro dávkování VOC v kapalném stavu**

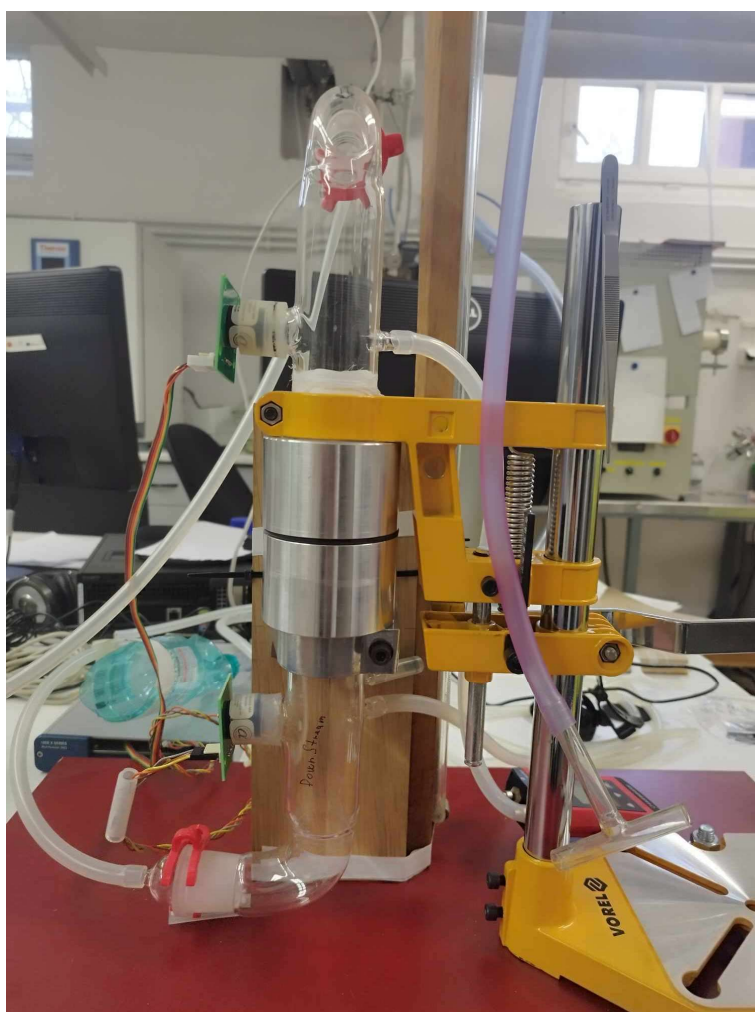
Pro dávkování těkavých organických látek (VOC) v kapalném stavu byla použita přesná injekční pumpa ISPLab01-G1 s dotykovým displejem. Tato pumpa podporuje použití skleněných stříkaček o objemu od 250  $\mu$ l do 25 ml, přičemž v tomto experimentu byla využita 1ml skleněná stříkačka s Luer Lock konektorem. Pumpa umožňuje velmi přesné dávkování VOC díky jemnému řízení rychlosti pohybu pístu. Přesnost dávkování je dána konstrukčními parametry pumpy a použitou stříkačkou, proto přesnost dávkování byla otázkou vlastního stanovení. V průběhu SVOČ (studentské vědecké výzkumné činnosti) byla chyba dávkování tohoto zařízení stanovena na méně než 1 %.

#### **5. Měřicí skleněné potrubí sestavené ze dvou oddělitelných částí**

Měřicí skleněné potrubí sestavené ze dvou oddělitelných částí, slouží jako klíčová součást experimentálního zařízení a umožňuje testování adsorpčních vlastností materiálů na bázi uhlíkových textilií (ACF). Potrubí má vnitřní průměr 3,72 cm a délka každé z oddělitelných částí činí 16 cm. Oddělitelné části potrubí jsou spojeny duralovými přírubami, mezi nimiž je

umístěn O-kroužek, který zajišťuje těsnost systému a eliminuje úniky vzduchu nebo VOC během experimentu.

Pro snadnou manipulaci a výměnu adsorpčního materiálu je potrubí vybaveno pákovým mechanismem, který umožňuje rychlé oddělení jednotlivých částí. Konstrukce potrubí obsahuje výdutě pro instalaci senzorů monitorujících koncentrace VOC a tlakové ztráty v systému. Celé měřicí potrubí je uvedeno na obrázku 6.



Obrázek 6: Měřicí skleněné části potrubí

## 6. Testovaný adsorpční materiál (ACF netkaná textilie)

Testovanými adsorpčními materiály jsou aktivované uhlíkové netkané textilie (ACF) od anglické firmy Nonwoven, které byly vybrány pro jejich vynikající adsorpční vlastnosti a široké uplatnění v oblasti filtrace a odstraňování těkavých organických látek (VOC). V rámci

experimentů byly použity tři různé typy těchto materiálů, které se liší svým složením, strukturou a fyzikálně-chemickými vlastnostmi. Klíčové parametry jednotlivých vzorků jsou shrnuty v tabulce 5 [36,35,36].

Tabulka 5: Charakterizace vzorků ACF

Vlastnost	Vzorek A (3390)	Vzorek B (3354)	Vzorek C (3352)
<b>Složení vláken</b>	100 % viskóza	88 % polyester, 12 % polyolefin	88 % polyester, 12 % polyolefin
<b>Zastoupení aktivního uhlí (g/m<sup>2</sup>)</b>	30	60	90
<b>Celková plošná hmotnost (g/m<sup>2</sup>)</b>	100	170	200
<b>Tloušťka (mm)</b>	0,54	0,80	0,80
<b>Propustnost vzduchu</b>	1750 l/m <sup>2</sup> /s při 200 Pa	2245 l/m <sup>2</sup> /s při 133 Pa	1500 l/m <sup>2</sup> /s při 133 Pa
<b>CTC adsorpce (%)</b>	65	75	75

Procentuální hodnota CTC adsorpce (%) vyjadřuje schopnost materiálu zachytávat organické látky na základě standardního testu adsorpce nasycených par tetrachlormethanu (CTC). Test probíhá za definovaných podmínek, kdy je měřena hmotnostní kapacita materiálu pro adsorpci tetrachlormethanu.

## 7. Fotoionizační detektory (PID)

Zařízení bylo vybaveno dvěma fotoionizačními detektory (PID) od firmy Alphasense, které sloužily k měření koncentrací těkavých organických látek (VOC) před průchodem adsorpčním materiálem (upstream) a po průchodu adsorpčním materiálem (downstream).

Detektory byly používány vždy ve dvojici – buď dva detektory modelu AY pro měření koncentrace acetonu, nebo dva detektory modelu AR pro měření koncentrace toluenu. Model AR je určen pro měření vyšších koncentrací VOC.

Tato konfigurace umožnila přesné sledování účinnosti adsorpce VOC na základě rozdílu mezi vstupní a výstupní koncentrací.

Oba modely mají maximální hranici lineární odezvy, tedy nejvyšší odezvy, při které je koncentrační závislost stále lineární, 2,8 V.

Vlastním měřením s isobutenem, jakožto doporučeným kalibračním plynem, byla chyba detektorů modelu AY stanovena na méně než 1 % a modelu AR méně než 2 % z naměřené hodnoty.

## 8. Teploměr s vlhkoměrem

Monitoruje teplotu a relativní vlhkost uvnitř měřicího potrubí, což je důležité pro vyhodnocení vlivu zejména teploty na adsorpci.

## 9. Diferenční barometr

Slouží k měření tlakových ztrát v systému při průchodu vzduchu adsorpčním materiálem.

## 3.2 Metody charakterizace ACF Charakterizace vzorků ACFA

V této kapitole jsou obsaženy metody, sloužící k charakterizaci vzorků, tedy BET ke stanovení distribuce pórů, SEM ke znázornění a možnému popisu struktury vláken, měření tlakové ztráty, jakožto klíčového parametru pro filtraci a adsorpci a DTA/TG analýza sloužící k posouzení vhodnosti vzorky termicky regenerovat.

### 3.2.1 BET analýza

#### **Princip BET analýzy**

Nejčastěji se používá dusík jako adsorbovaný plyn při teplotě kapalného dusíku (-196 °C). Molekuly plynu se adsorbují na povrchu materiálu, přičemž první vrstva je silně vázána na povrch, zatímco další vrstvy jsou slaběji vázány. Množství adsorbovaného plynu je měřeno při různých relativních tlacích ( $p/p_0$ ), což vede k vytvoření izotermy adsorpce [37].

Na základě izotermy se pomocí BET rovnice vypočítává množství plynu potřebného k pokrytí povrchu monovrstvou. Z této hodnoty a molekulární plochy adsorbovaného plynu lze vypočítat specifický povrch materiálu. BET analýza také poskytuje informace o objemu pórů a velikosti pórů, což je zásadní pro charakterizaci porézních struktur.

### 3.2.2 Elektronová mikroskopie (SEM)

Skenovací elektronová mikroskopie je zobrazovací technika, která využívá svazek urychlených elektronů ke skenování povrchu vzorku a získání detailních informací o jeho topografii a složení. Elektronový svazek je generován zdrojem elektronů, například wolframovým vláknem nebo polem emisního zdroje, a urychlován vysokým napětím.

Tento svazek je zaostřen elektromagnetickými čočkami do úzkého paprsku, který postupně skenuje povrch vzorku [38].

Při interakci elektronů s povrchem vzorku vznikají různé signály, jako jsou sekundární elektrony, zpětně odražené elektrony nebo charakteristické rentgenové záření. Sekundární elektrony jsou nejčastěji využívány k vytvoření obrazu, protože poskytují informace o topografii povrchu [39].

Obraz je vytvářen detekcí intenzity signálů v závislosti na poloze elektronového svazku během skenování povrchu vzorku. Výsledkem je detailní trojrozměrný obraz povrchu s vysokým rozlišením, který umožňuje studium morfologie a struktury materiálů na mikro- a nanometrické úrovni.

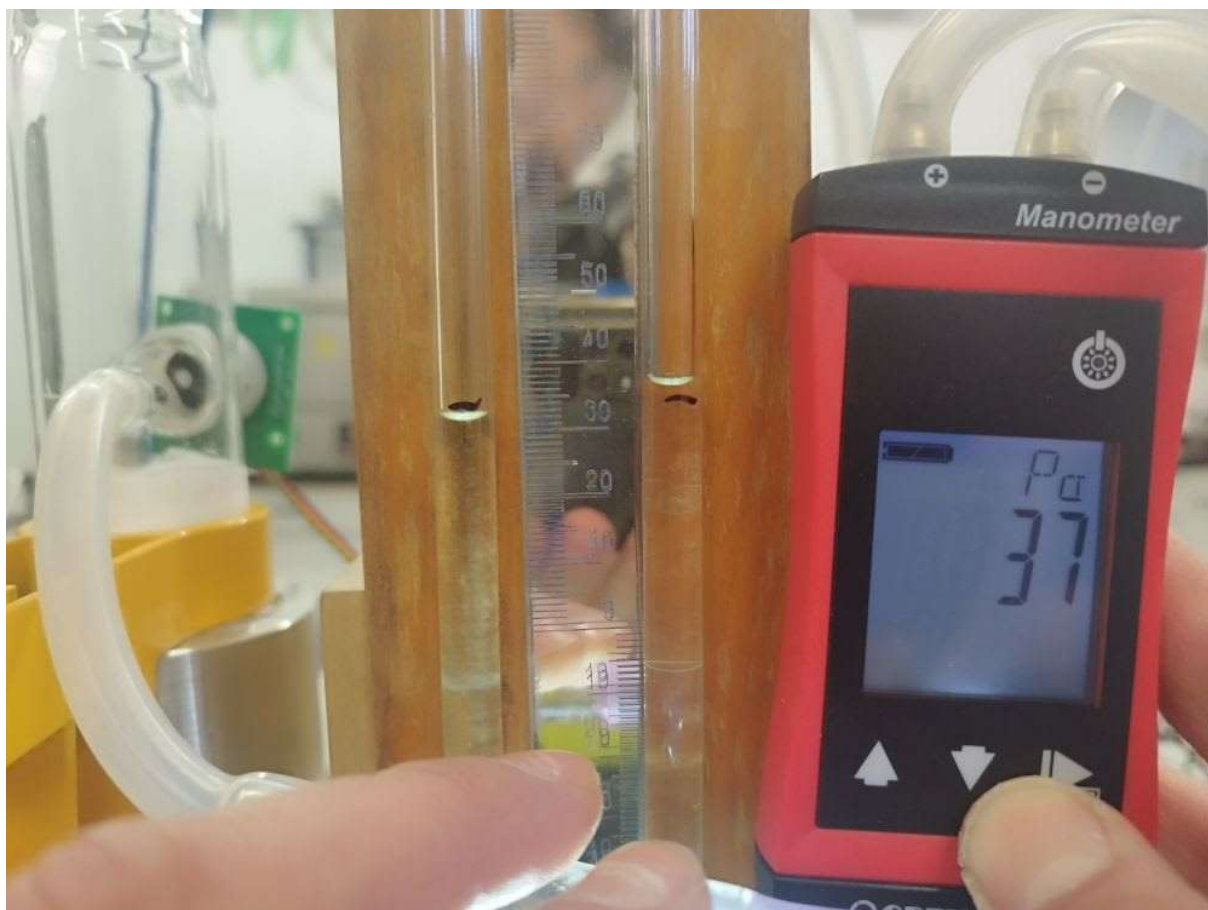
### 3.2.3 Měření tlakové ztráty

Tlaková ztráta byla měřena na vzorcích aktivovaných uhlíkových netkaných textiliích označených jako A (3390), B (3354) a C (3352), a také na referenčním materiálu Reifenhäuser Meltblown, který se běžně používá jako vložka do respirátorů. Měření bylo provedeno při různých průtocích vzduchu, aby bylo možné sledovat závislost tlakové ztráty na rychlosti proudění.

Pro stanovení tlakové ztráty byly použity dvě metody měření, které probíhaly současně, jak lze vidět na obrázku 7. Prvním způsobem bylo použití digitálního diferenciálního tlakoměru Greisinger GDH 200-13, který byl připojen k místům před a za přepážku obsahující testovaný materiál. Druhým způsobem bylo kontrolní měření pomocí U-trubice naplněné isopropanolem. Isopropanol byl zvolen jako pracovní kapalina díky své nižší hustotě ve srovnání s vodou. Tato vlastnost vedla k větší výchylce hladiny v obou ramenech trubice při stejném tlakovém rozdílu, což umožnilo přesnější odečítání hodnot.

Obě metody poskytly konzistentní výsledky a umožnily přesné stanovení tlakových ztrát pro všechny testované materiály. Výsledky experimentu ukázaly rozdíly v propustnosti jednotlivých vzorků.

Referenční materiál reifenhäuser byl zahrnut do měření jako standardní porovnávací vzorek, což umožnilo vyhodnotit relativní vlastnosti aktivovaných uhlíkových netkaných textilií.



Obrázek 7: Měření tlakové ztráty pomocí digitálního diferenciálního tlakoměru Greisinger GDH 200-13 (vpravo) a U-trubice naplněné isopropanolem (vlevo)

### 3.2.4 DTA/TG analýza

DTA/TG analýza (diferenciální termická analýza a termogravimetrická analýza) je kombinovaná metoda používaná k charakterizaci tepelných vlastností materiálů. Tato technika umožňuje současné sledování tepelných efektů (DTA) a změn hmotnosti (TG) vzorku při řízeném ohřevu nebo chlazení.

Rozdíl teplot mezi vzorkem a referenčním materiálem měří DTA, což umožňuje detekovat tepelné efekty, jako je tání, rozklad nebo chemické reakce. Tyto procesy se na DTA křivce projevují jako exotermické nebo endotermické píky.

Termogravimetrická analýza sleduje změny hmotnosti vzorku v závislosti na teplotě, což umožňuje identifikovat procesy, jako je odpařování těkavých látek, rozklad organických složek nebo oxidace materiálu.

Kombinace těchto metod poskytuje detailní informace o tepelném chování materiálů, jejich stabilitě a chemických reakcích probíhajících při zahřívání nebo chlazení.

V rámci experimentu byla DTA/TG analýza provedena na vzorcích ACF, konkrétně na vzorcích označených jako A (3390), B (3354) a C (3352) na přístroji STA 449 F5 Jupiter. Tyto textilie byly zkoumány kvůli jejich potenciálu jako adsorpčních materiálů. Cílem bylo charakterizovat jejich tepelnou stabilitu a analyzovat procesy spojené s uvolňováním adsorbovaných těkavých organických látek (VOC), které jsou klíčové pro hodnocení jejich adsorpční kapacity.

DTA/TG analýza byla použita ke sledování chování těchto materiálů při zahřívání od pokojové teploty až po vysoké teploty přesahující 1000 °C při ohřevu 10 °C/min. Analýza poskytla informace o tom, jak se tyto textilie chovají při tepelném namáhání, a umožnila určit jejich vhodnost pro aplikace vyžadující regeneraci adsorpčního materiálu zahříváním. Kromě toho byly analyzovány procesy degradace uhlíkového materiálu, které mohou ovlivnit dlouhodobou funkčnost těchto textilií.

### 3.3 Metodika experimentu

Vzorky aktivovaných uhlíkových netkaných textilií (ACF) byly připravovány tak, aby byly vhodné pro následná měření jejich fyzikálních a chemických vlastností. Nejprve byly z velkých textilií vyseknuty kruhové vzorky o průměru 4 cm, což zajistilo jednotné rozměry pro použití v experimentálním zařízení.

Po vyseknutí byly vzorky umístěny do sušárny, kde probíhal proces regenerace. Vzorky byly vystaveny teplotě 70 °C po dobu 2 hodin za vakua, tedy tlaku 3–10 Pa. Tento proces měl dvojitý účinek: umožnil desorpci zbytků adsorbovaných látek z povrchu textilií a zároveň zajistil jejich

důkladné vysušení. Tím se minimalizovala přítomnost vlhkosti nebo jiných těkavých látek, které by mohly ovlivnit výsledky následných měření. Po regeneraci byly vzorky uchovávány v exsikátoru, kde byly skladovány v suchém prostředí, aby se zabránilo opětovné adsorpci vlhkosti nebo jiných látek ze vzduchu.

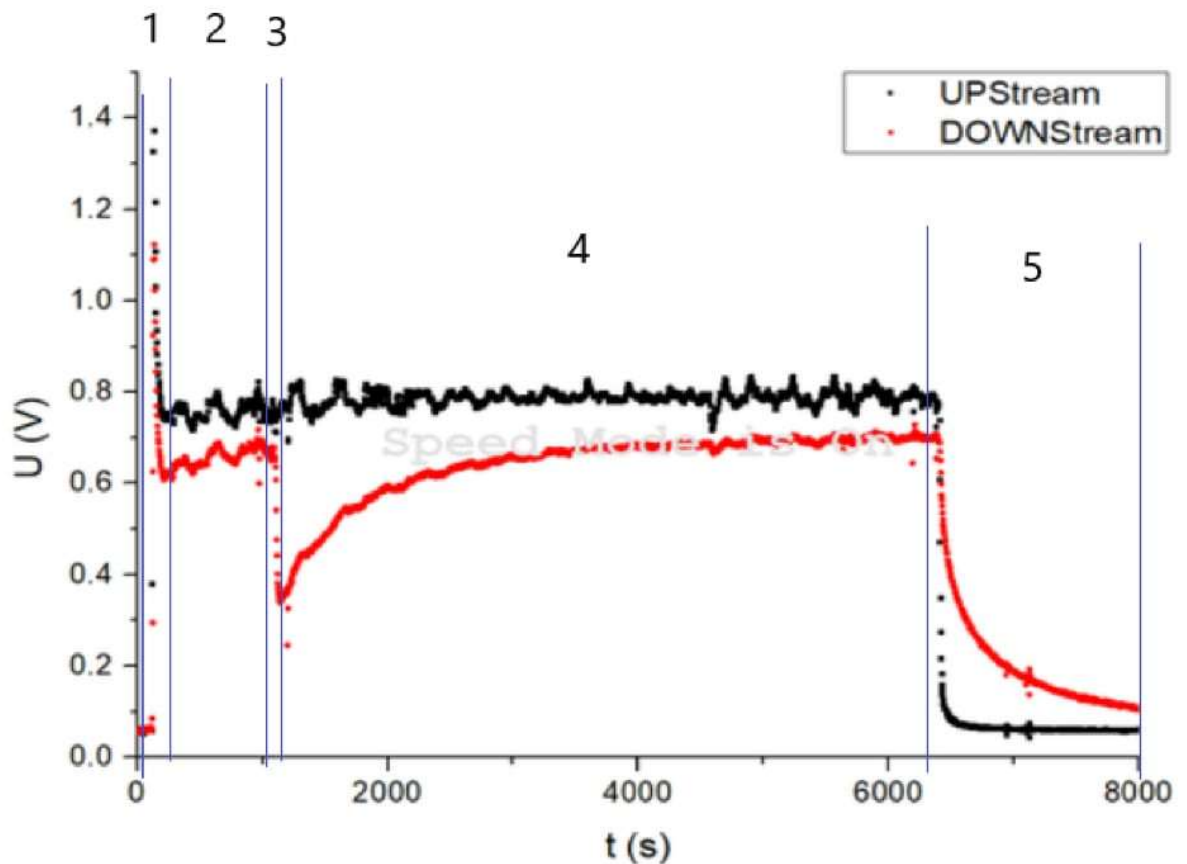
Před zahájením měření byla vytvořena směs vzduchu a VOC, konkrétně acetonu nebo toluenu. Vzduch byl přiváděn od kompresoru přes sušičku, aby byla zajištěna jeho suchost. Do tohoto proudu vzduchu byla přidána dávka těkavé organické látky tak, aby výsledná směs obsahovala požadovanou koncentraci VOC vyjádřenou v jednotkách ppm. Tento proces zajišťoval přesně definované parametry směsi jak z hlediska průtoku (a tedy i rychlosti) směsi, tak koncentrace VOC.

Po nastavení požadovaných parametrů byla směs ponechána za těchto podmínek po dobu 15–30 minut, aby bylo dosaženo stabilního stavu. V okamžiku, kdy byly podmínky stabilní, byl do měřicího zařízení vložen vzorek textilie. Skleněné části zařízení byly odděleny, aby bylo možné mezi ně vložit kruhový vzorek ACF o průměru 4 cm odpovídající jednomu z testovaných materiálů (A, B nebo C). Vzorek byl pevně upevněn tak, aby směs vzduchu a VOC mohla volně proudit skrze jeho strukturu.

U vzorku B nebylo měření provedeno pouze na jedné vrstvě materiálu, ale také na vícevrstvě uspořádání. Konkrétně byly testovány konfigurace s jednou, dvěma a třemi vrstvami tohoto materiálu. Cílem bylo zjistit, zda více vrstev dokáže zvýšit schopnost materiálu udržet adsorbční účinnost větší než 90 % více než 10 minut.

Během celého procesu měření byly koncentrace VOC snímány pomocí PID senzory, které byly umístěny před a za vzorkem. Software připojený k detektorům kontinuálně zaznamenával hodnoty napětí každou sekundu jak během stabilizace, tak během samotného měření, typický průběh a záznam měření je na obrázku 8. Naměřené hodnoty napětí byly následně převedeny na koncentrace VOC pomocí kalibračních metod.

Na základě rozdílu koncentrací VOC před průchodem a po průchodu vzorkem byla vypočítána adsorpční kapacita jednotlivých materiálů. Experimenty zahrnovaly nejen porovnání různých typů filtrů (A, B a C), ale také sledování závislosti adsorpční kapacity na průtoku směsi, koncentraci VOC ve vstupní směsi a počtu vrstev.



Obrázek 8: Typický záznam měření

### Popis grafu a interpretace jednotlivých oblastí

Graf zobrazuje průběh napětí, jakožto odezvy na PID senzoru, na čase. Snímán byl upstream (černá křivka) i downstream (červená křivka) při měření absorpce těkavých organických látek (VOC) pomocí aktivního uhlí typu ACF. Graf je rozdělen do pěti klíčových oblastí.

#### Oblast 1 – Ustálení přísunu VOC

Na začátku experimentu byla do potrubí vpuštěna těkavá organická látka (VOC) společně se vzduchem. V této fázi docházelo k míchání VOC se vzduchem a ustalování koncentrace v proudu směsi, která protékala potrubím. Napětí na obou detektorech PID (upstream i downstream) kolísalo, protože koncentrace VOC ještě nebyla stabilní.

### **Oblast 2 – Autokalibrace (stabilní oblast)**

Po ustálení koncentrace VOC v potrubí dosáhly obě křivky stabilních hodnot. Tato oblast byla využita pro autokalibraci detektorů PID. Průměrná hodnota napětí upstream byla použita jako referenční odezva pro předem vypočítanou koncentraci VOC, která byla do systému vháněna. V této oblasti již směs byla homogenní, čemuž odpovídá i oscilace odezvy detektoru kolem střední hodnoty, která byla po zbytek experimentu brána za stabilní. Horní a spodní detektor má při stejné koncentraci VOC mírně rozdílnou odezvu na koncentraci VOC, proto je potřeba každý detektor kalibrovat.

### **Oblast 3 – Vložení adsorpční přepážky**

Do systému byla vložena adsorpční přepážka z netkané textilie s aktivním uhlím (ACF). To vedlo k poklesu downstreamové odezvy (červená křivka), protože část VOC byla zachycena adsorpčním materiálem.

### **Oblast 4 – Fáze adsorpce**

V této oblasti probíhala adsorpce VOC na ACF. Napětí na upstream zůstalo konstantní, což naznačuje konstantní přísun VOC do systému. Naproti tomu downstreamová odezva byla nižší, což ukazuje na účinnost absorpčního procesu.

### **Oblast 5 – Fáze desorpce**

Na rozhraní mezi oblastmi 4 a 5 byla odpojována jehla dávkující VOC, a do systému začal proudit čistý vzduch, což vedlo k prudkému poklesu downstreamové odezvy (červená křivka), protože již nebyly přítomny žádné VOC. Upstreamová odezva také postupně klesala, jak se systém proplachoval.

## 4. Výsledky a diskuze

Cílem této práce bylo sestavit zařízení pro testování tenkých porézních vzorků vhodných pro záchyt (adsorpci těkavých organických látek), otestovat vybrané netkané textilie ACF pro různé podmínky použití, jakož jsou různé organické těkavé látky (v našem případě aceton – zástupce polárních a toluen – zástupce nepolárních VOC), za podmínek běžných ve filtraci jako je rychlost od jednotek po třicet cm/s a koncentrace VOC v rozmezí 10 – 100 PPM a pro vybraného kandidáta (vzorku) netkaných textilií ACF sestavit z více vrstev filtr, který bude mít účinnost záchytu větší než 90% po dobu 10 minut, což jsou vhodné podmínky pro návrh regenerativního filtru VOC.

První část práce spočívala v sestavení robustní, těsné, inertní (skleněné) testovací aparatury vybavené měřením důležitých stavových veličin teplota, vlhkost s přesnou regulací průtoku. Aparatura je navržena pro reprezentativní kruhové vzorky o průměru 3,72 cm a jedné až cca třech vrstev vzorků. Pro vlastní testování ACF, což je materiál sloužící k záchytu VOC ze vzduchu (vody) je důležité pracovat za podmínek běžných z „filtrační praxe“, proto jsme zařízení navrhli a ověřili pro generování VOC ve vzduchu o koncentraci 300 PPB až 100 PPM a čelní rychlosti proudícího vzduchu přes vzorek od jednotek po 30 cm/s. Pro dosažení přesné koncentrace VOC ve vzduchu je důležitá přesnost dávkování kapalné VOC, kterou jsme stanovili váhově pod 3 %, přičemž regulace průtoku vzduchu je dle výrobce průtokoměru a regulátoru menší než 0,1% v daném rozsahu. Měřicí komora je skleněná, inertní vhodná pro měření do teploty 50°C.

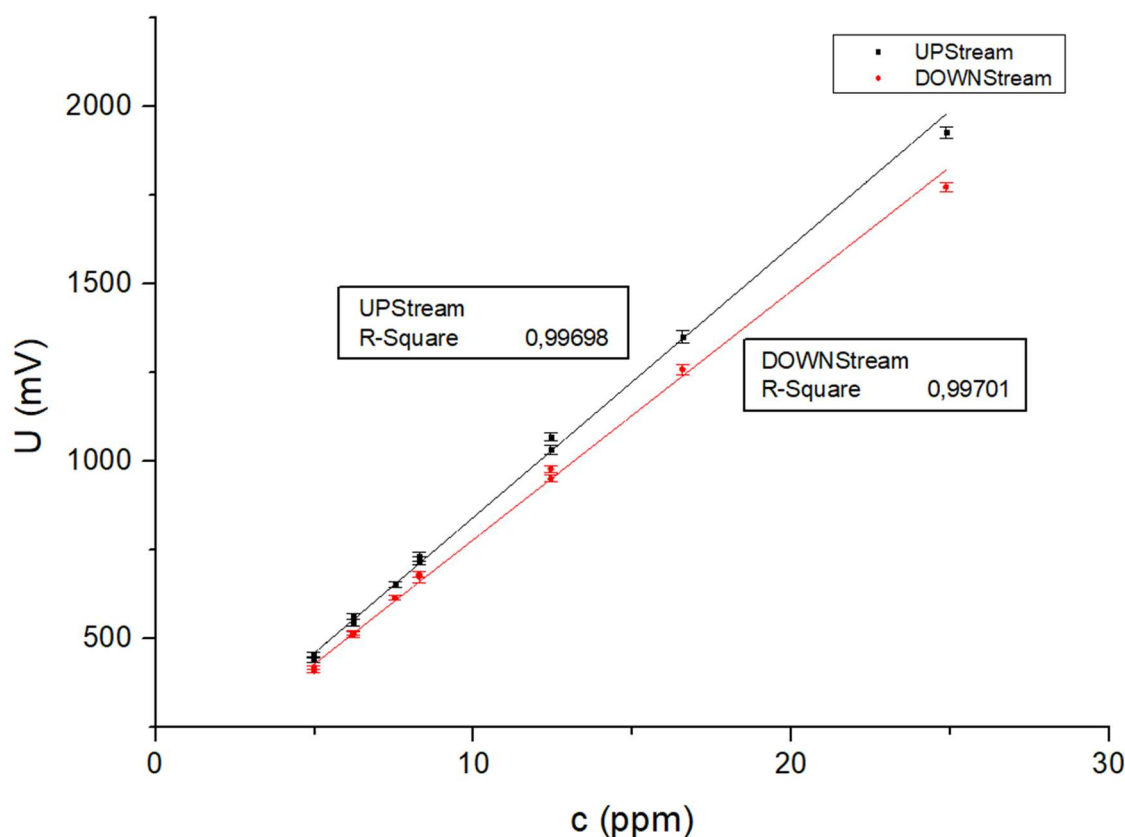
Důležitou částí práce bylo testování a kalibrace PID senzorů těkavých látek. Kalibraci jsme prováděli jak na zakoupený kalibrační plyn isobuten 20 PPM s čistotou 5N, tak metodou autokalibrace z důvodu eliminace stárnutí senzorů PID a jejich driftu. Navržené řešení zajistilo vysokou přesnost měření po celou dobu práce (více viz kapitola 4.1). Pro zvýšení citlivosti měření jsme zakoupili dvě sady PID detektorů pro rozmezí 0 – 20 PPM a 0 – 200 PPM VOC. Měřený signál PID detektoru byl v celém rozsahu proporcionální a jeho kvalita vyhovovala dalšímu numerickému zpracování.

Pro vlastní charakterizaci materiálů ACF a jejich vhodnost pro záchyt v těkavých látek v proudu vzduchu např. v čističkách vzduchu jsme provedli charakterizaci u vybraného

vzorku B, podle níže uvedených metod. Vlastní schopnost adsorpce a informací vlastnostech aktivního uhlí naneseného na vlákna vzorku jsem vyhodnotil pomocí BET analýzy (4.2.). Vhodnost materiálu pro regeneraci (desorbci VOC) v proudu teplého vzduchu nebo přímým ohřevem jsme hodnotili pomocí DTA/TG analýzy (4.3.). Významnou výhodou ACF materiálů je oproti klasickému práškovému nebo granulovanému vzorku je významně nižší tlaková ztráta při průchodu vzduchu. Měření tlakové ztráty bylo provedeno spolu s referenčním vzorkem pro záchyt aerosolů (4.4.). Přímý pohled na strukturu vzorku ACF, tloušťku vlákna a kotvení aktivního uhlí na povrchu vzorku lze nalézt v kapitole 4.5. SEM mikroskopie.

Pro vlastní dynamické měření adsorpce těkavých látek v proudu vzduchu byly vybrány dvě těkavé látky se kterými se lze setkat v interiéru aceton a toluen. Aceton zástupce polárních a toluen nepolárních VOC. První část měření (kapitola 4.4.1) je věnována měření adsorbce acetonu, kde jsem provedl u vzorku B měření adsorpce s rostoucí koncentrací acetonu od 5 do 30 PPM, poté pro vzrůstající čelní rychlost vzduchu s VOC od 4 do 30 cm/s. Dále jsem provedl měření které mělo zhodnotit kvalitu třech různých vzorků ACF. Ve druhé části (kapitola 4.4.2) měření jsem se věnoval adsorbci toluenu. Proměřil jsem tři různé vzorky ACF. U vybraného vzorku ACF s označením B byla provedena série měření s jednou, dvěma a třemi vrstvami ACF materiálu.

## 4.1 Kalibrace



Obrázek 9: Kalibrace PID typu AY na aceton

### 4.1.1 Analýza odezvy fotoionizačních detektorů

Měření VOC pomocí PID senzorů ukázalo, že odezva (napětí) na koncentraci VOC je během měření lineární, což lze vidět na obrázku 9. Linearita odezvy byla pozorována napříč všemi experimenty a je klíčová pro přesnou kalibraci senzorů. Na základě provedených měření byla zároveň zjištěna odezva detektorů na pozadí (čistý vzduch), která činila přibližně 60 mV. Tato hodnota odpovídá stavu, kdy v měřeném prostředí nejsou přítomny žádné organické látky.

Nicméně dlouhodobé experimenty odhalily, že odezva senzorů vykazuje drift neboli postupný posun odezvy v čase, což zvyšuje rozptyl naměřených hodnot napříč různými

experimenty. Drift byl sledován u různých typů senzorů, přičemž rozsah jejich odchylek byl následující:

Model senzorů AY (použitý pro aceton): Bylo zjištěno, že směrodatná odchylka odezvy činí více než 10 %.

Model senzorů AR (použitý pro toluen) směrodatná odchylka dosahovala přibližně 4 %.

### **Důvody driftování fotoionizačních detektorů**

Driftování senzorů PID je způsobeno několika faktory, které ovlivňují přesnost jejich dlouhodobého měření:

#### **Slábnutí výkonu UV diody**

UV dioda, která generuje ionizační záření v detektoru, postupem času ztrácí svou intenzitu. Ztráta intenzity vede ke snížení množství ionizované VOC a tedy poklesu odezvy napětí na stejnou koncentraci VOC. To vede k driftování.

#### **Zanášení mřížkových elektrod**

Mřížkové elektrody detektoru se během provozu zanáší a tím se snižuje její odezva na koncentraci iontů v měřící komůrce.

## **4.1.2 Autokalibrace**

Vzhledem k výše uvedeným faktorům je nezbytné provádět autokalibraci senzorů na začátku každého experimentu, aby bylo možné korigovat drift a zajistit přesnost výsledků.

### **Autokalibrace detektorů**

Na obrázku 8 má z pohledu autokalibrace klíčovou roli v tomto experimentu oblast 2, označená jako oblast autokalibrace (případně stabilní oblast). V této oblasti bylo dosaženo

stabilní koncentrace VOC v systému bez přítomnosti adsorbentu, což umožnilo odečíst průměrnou hodnotu napětí detektoru.

Průměrná hodnota napětí získaná v oblasti 2 slouží jako referenční bod pro koncentraci VOC v detektoru. Díky znalosti lineární odezvy detektoru na koncentraci VOC je možná kalibrace tak, aby odezva senzorů odpovídala konkrétní koncentraci VOC, která byla do systému dodávána. Tento postup autokalibrace zajišťuje možnost sledování aktuální koncentrace VOC v průběhu celého měření a eliminuje nepřesnosti způsobené driftováním senzorů.

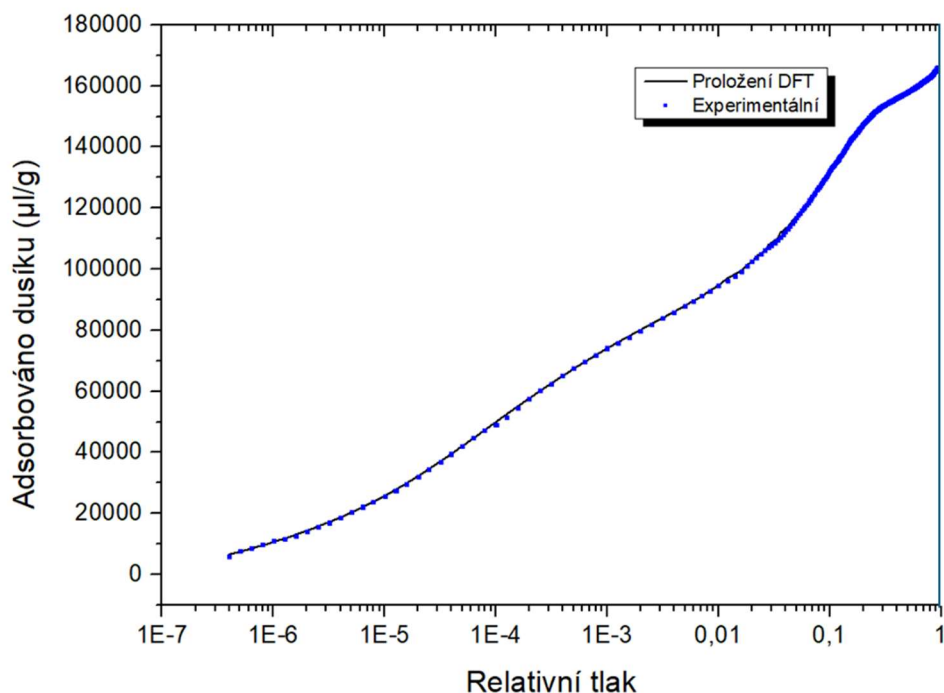
### **Význam autokalibrace v každém měření**

Pro každé jednotlivé měření byla prováděna autokalibrace detektorů, která byla založena na odečtení odezvy detektoru na pozadí (čistý vzduch) a na stabilní koncentraci VOC v oblasti 2.

Autokalibrace byla aplikována na každé jednotlivé měření a zajistila spolehlivost výsledků, která by jinak byla ovlivněna driftováním detektorů (zejména u acetonových senzorů typu AY).

## **4.2 BET analýza – charakteristika ACF**

BET analýza byla provedena za účelem charakterizace povrchových vlastností použitého materiálu. Získané výsledky poskytují detailní informace o specifické povrchové ploše, objemu pórů a jejich distribuci, což jsou klíčové parametry pro hodnocení absorpční kapacity materiálu vůči těkavým organickým látkám (VOC). Všechny výsledky v této podkapitole jsou měřeny dvakrát na vzorku B a jsou vztaženy na 1 g ACF, nikoliv čistého AC. Na obrázku 10 je izoterma naměřených dat (modré body), proložená DFT modelem (černá křivka), vhodným pro měření mikroporézních materiálů.



Obrázek 10: Adsorpční izoterma dusíku při 77 K

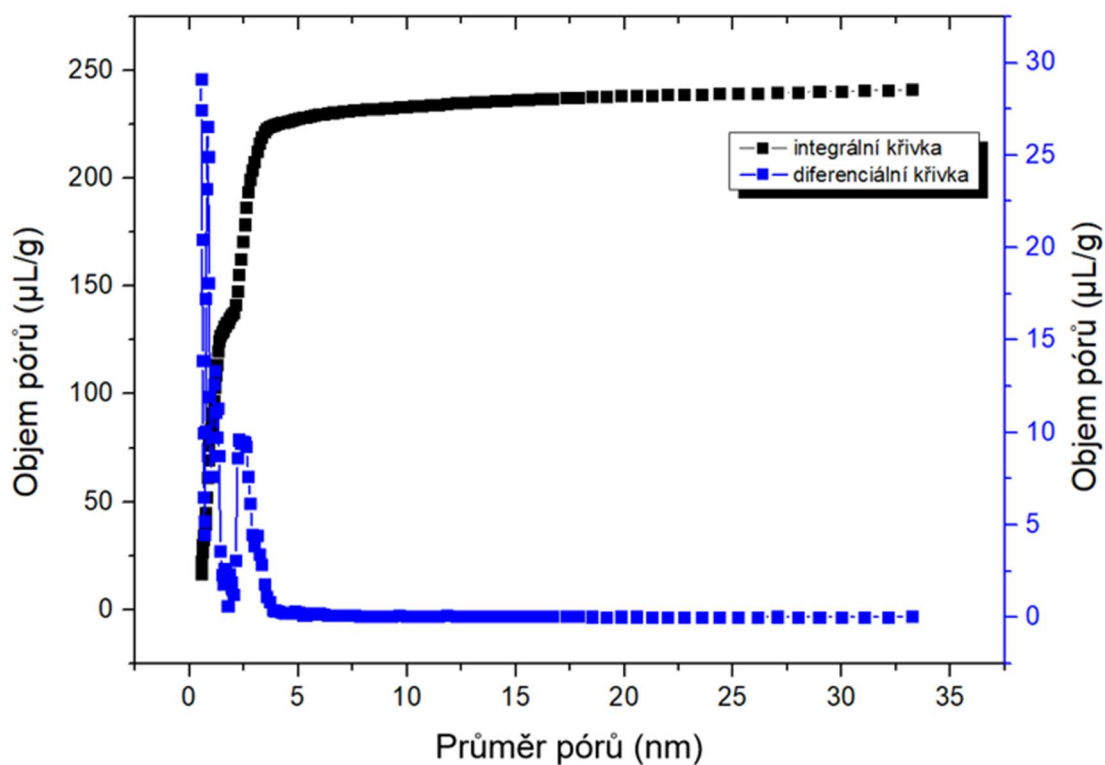
#### 4.2.1 Specifická povrchová plocha

Vzorek B vykazuje specifický povrch na gram aktivního uhlí v oblasti mikropórů  $1337 \text{ m}^2/\text{g}$  s relativní odchylkou 0,75 % a v oblasti mezopórů  $70,3 \text{ m}^2/\text{g}$  s relativní odchylkou 2 %, což potvrzuje přítomnost dostatečně velkého aktivního povrchu pro absorpci VOC, viz srovnání s literaturou [Summers a kol., 2022]. Tento parametr je zásadní pro zachytávání molekul VOC na povrchu materiálu.

#### 4.2.2 Specifický objem pórů

Specifický objem mikropórů na gram aktivního uhlí činil  $0,6783 \text{ cm}^3/\text{g}$  s relativní odchylkou 1,06 % a specifický objem mezopórů činil  $0,09 \text{ cm}^3/\text{g}$  s relativní odchylkou 2,24 %, což odpovídá materiálu s dobře vyvinutou porézní strukturou, viz srovnání s literaturou [Summers a kol., 2022]. Tato vlastnost je důležitá pro efektivní zachytávání těkavých organických látek.

Distribuce mikropórů byla analyzována metodou DFT na obrázcích 10 a 11. Výsledky ukazují integrální i diferenciální křivku rozdělení objemů pórů v závislosti na jejich velikosti, tedy průměru.



Obrázek 11: Rozložení objemů pórů ve vzorku B

#### 4.3 DTA/TG analýza – charakteristika ACF

Následují výsledky termogravimetrické analýzy (TG) všech tří testovaných vzorků označených jako A, B a C. V tabulce 6 jsou uvedeny klíčové parametry, které byly u jednotlivých vzorků sledovány, včetně hodnot ztráty hmotnosti při různých teplotách a celkové teplotní stability. Tyto údaje umožňují přímé porovnání vlastností jednotlivých materiálů a jejich vhodnosti pro teplotní regeneraci.

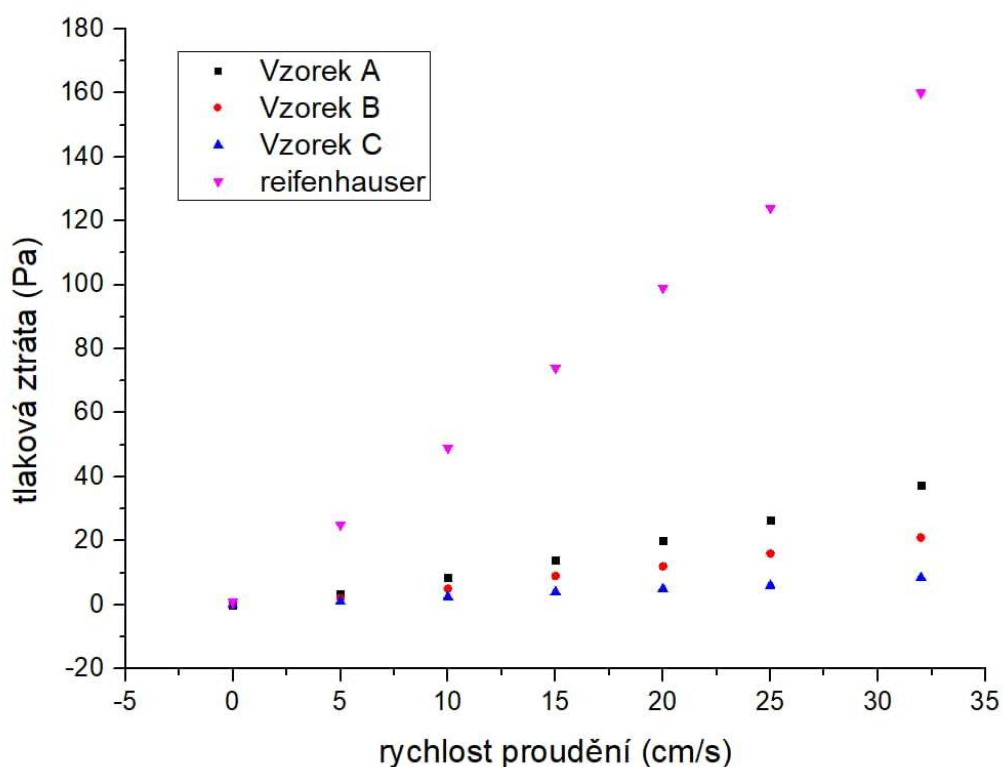
Tabulka 6: Výsledky DTA/TG analýzy

Kritérium	Vzorek B	Vzorek C	Vzorek A
Teplotní stabilita	vysoká (~370 °C)	vysoká (~363 °C)	nízká (~250 °C)
Změna hmotnosti na začátku	ne	ne	ano (~1,6 % pod 150 °C)
Komplexnost rozkladu (DTG)	1 pík	1 pík	komplexní (2+ píky)
Celkový rozklad (%)	~51 %	~50 %	~57 % (největší)
Zbytková hmota (~1000 °C)	~49 %	~50 %	~42 %

Na základě údajů uvedených v tabulce 6 lze konstatovat, že vzorek A je nevhodný pro regeneraci (zejména termickou při teplotách přibližně 150 °C). Tento vzorek vykázal výraznou ztrátu hmotnosti již při nízkých teplotách (pod 150 °C), což svědčí o jeho nízké teplotní stabilitě. Navíc došlo u tohoto vzorku k největšímu úbytku hmotnosti během rozkladu ve srovnání s ostatními vzorky. Takové vlastnosti vylučují jeho praktické využití v aplikacích, kde je požadována opakovaná regenerace materiálu pomocí vyšší teploty. Oproti tomu vzorky B a C vykazují vyšší teplotní stabilitu a nižší ztrátu hmotnosti, což je předpokladem pro jejich další využití v procesech teplotní regenerace.

#### 4.3. Stanovení tlakových ztrát vzorků a referenčního materiálu

Na obrázku 13 je graf zobrazující závislost tlakové ztráty na rychlosti proudění pro čtyři různé vzorky – Vzorek A, Vzorek B, Vzorek C a referenční vzorek reifenhauser. Referenční vzorek je materiál pro filtraci aerosolů s filtrační účinností větší než 90 %.



Obrázek 12: Stanovení tlakových ztrát vzorků

Z grafu je patrné, že tlaková ztráta roste se zvyšující se rychlostí proudění u všech vzorků, přičemž nejvyšší hodnoty tlakové ztráty vykazuje materiál reifenhauser. Vzorky A, B a C mají výrazně nižší tlakové ztráty, přičemž nejnižší hodnoty dosahuje vzorek C a nejvyšší z této trojice vzorek A.

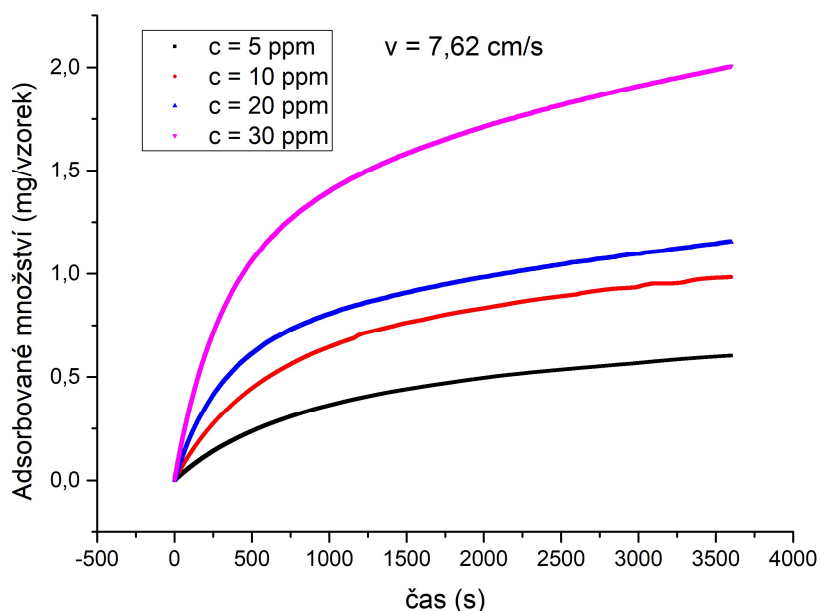
## 4.4 Vyhodnocení adsorpce

### 4.4.1 Vyhodnocení adsorpce acetonu

#### Série experimentů s proměnlivou koncentrací

Adsorpce acetonu (jakožto zástupce polárních látek) na ACF (vzorek B) byla v první sérii experimentů sledována při konstantní rychlosti proudění 7,62 cm/s, přičemž se měnila pouze počáteční koncentrace acetonu v přiváděné směsi. Výsledky jsou prezentovány na

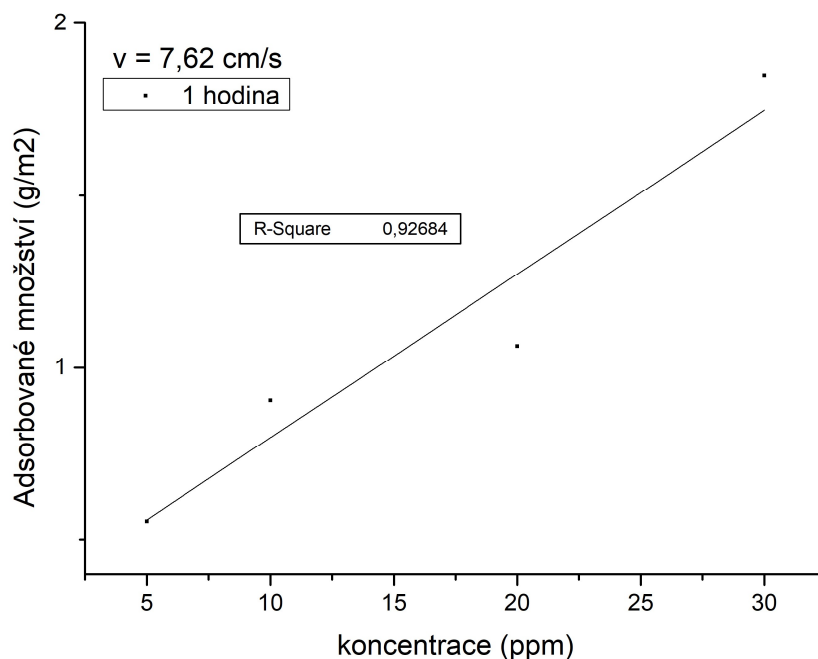
obrázku 14, kde jsou zobrazeny průběhy adsorbovaného množství acetonu v čase pro čtyři různé vstupní koncentrace (5, 10, 20 a 30 ppm).



Obrázek 13: Průběh adsorpce polárních látek na vzorku B při konstantní rychlosti proudění

Průběh adsorpce acetonu na ACF při různých vstupních koncentracích, patrné, že s rostoucí koncentrací acetonu dochází k výraznému zvýšení adsorbovaného množství na vzorek ACF. Všechny křivky vykazují rychlý počáteční nárůst, který se s časem zpomaluje, což odpovídá typickému průběhu fyzikální adsorpce na porézních materiálech.

Pro kvantitativní srovnání byla z těchto dat vybrána hodnota po jedné hodině adsorpce a závislost adsorbovaného množství na počáteční koncentraci byla znázorněna v samostatném grafu (obrázek 15).



Obrázek 14: Závislost adsorbovaného množství acetonu na vstupní koncentraci po 1 hodině adsorpce

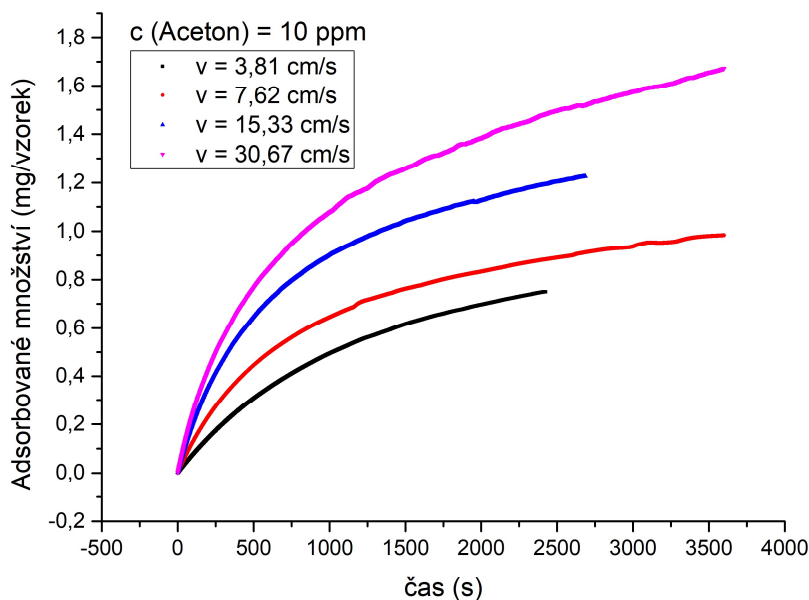
Z těchto výsledků vyplývá, že s rostoucí koncentrací acetonu ve vstupní směsi dochází k vyššímu zatížení filtru a rychlejšímu nasycení adsorbentu. Tento trend je důležitý pro praktické aplikace, protože ukazuje v souladu s literaturou [39], že kapacita ACF je silně ovlivněna koncentrací těkavých organických látek v prostředí

Celkově lze konstatovat, že při konstantní rychlosti proudění je adsorpční kapacita ACF pro aceton významně ovlivněna právě koncentrací ve vstupní směsi, což je klíčové pro návrh a dimenzování systémů v reálných provozních podmínkách.

### Série experimentů s proměnlivou rychlostí proudění

Při této sérii experimentů byla koncentrace acetonu ve vstupní směsi udržována konstantní (10 ppm) a měnila se pouze rychlost proudění plynu přes vzorek B aktivního uhlíkového vlákna (ACF). Výsledky jsou shrnuty na následujících dvou grafech.

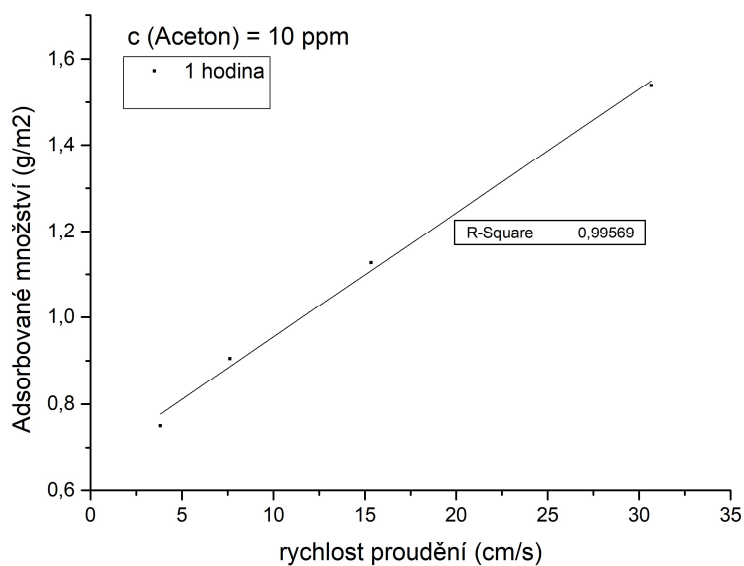
Na obrázku 16 je znázorněn průběh adsorpce acetonu v čase při různých rychlostech proudění.



Obrázek 15: Průběh adsorpce acetonu na vzorku B při konstantní koncentraci

Z grafu je patrné, že s rostoucí rychlostí proudění dochází k nárůstu adsorbovaného množství acetonu na ACF v daném čase. Nejvyšší hodnoty jsou dosaženy při nejvyšší rychlosti proudění, zatímco při nejnižší rychlosti je adsorbované množství nejnižší. Všechny křivky vykazují rychlý počáteční nárůst, který se s časem zpomaluje, a blíží se ustálené hodnotě, což odpovídá dynamické rovnováze systému. V literatuře byla závislost adsorbovaného množství toluenu na rychlosti proudícího media studována na granulovaném aktivním uhlí [40]. Autoři neuvádějí nárůst adsorbovaného množství toluenu s rostoucí rychlostí. To si vysvětlují omezeným rozsahem studovaných čelních rychlostí od 8 cm/s do 15 cm/s (dvojnásobný nárůst). V našem případě byl rozsah rychlostí sledován od 3 cm/s do 30 cm/s (desetinásobný nárůst).

Pro kvantitativní srovnání byla z těchto dat vybrána hodnota po jedné hodině adsorpce a závislost adsorbovaného množství na rychlosti proudění je zobrazena na obrázku 17.



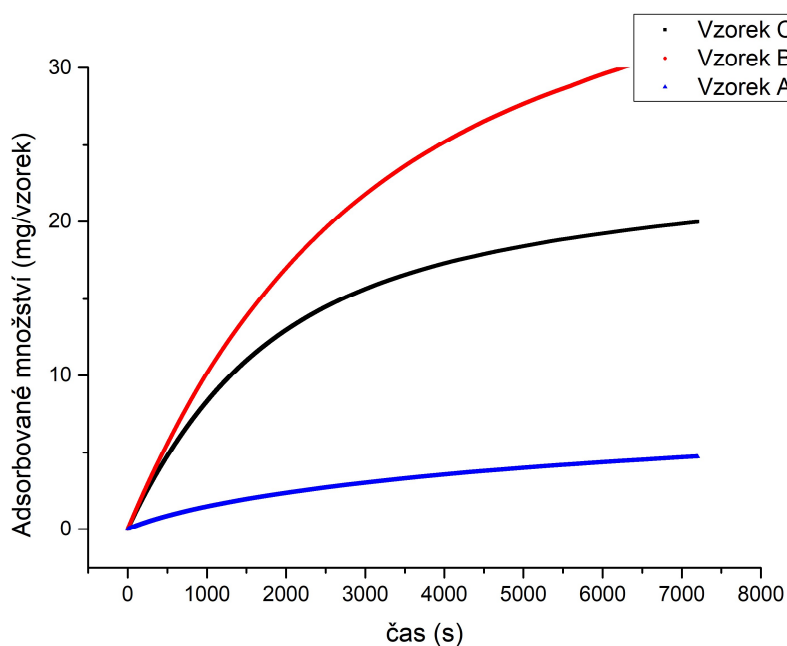
Obrázek 16: Závislost adsorbovaného množství acetonu na počáteční koncentraci po 1 hodině adsorpce

Obrázek 16 jasně ukazuje, že s rostoucí rychlostí proudění roste i množství acetonu zachyceného na ACF po jedné hodině. Tento výsledek je způsoben tím, že při vyšších rychlostech je adsorbentu nabídnuto větší celkové množství acetonu za stejný čas, a pokud není adsorbent zcela nasycen, může zachytit více látky. V rámci sledovaných podmínek se tedy adsorpční kapacita v daném čase zvyšuje s průtokem. Na druhou stranu je potřeba uvést, že se zvyšující rychlostí se zvyšuje lineárně tlaková ztráta adsorbční vrstvy a též poklesá adsorbční účinnost.

#### 4.4.2 Vyhodnocení adsorpce toluenu

##### Série měření s různými vzorky

Na obrázku 17 je znázorněn průběh adsorpce toluenu na třech různých vzorcích aktivního uhlíkového vlákna (označených jako vzorek A, B a C) při konstantní koncentraci toluenu 50 ppm a konstantní rychlosti proudění 8 cm/s.

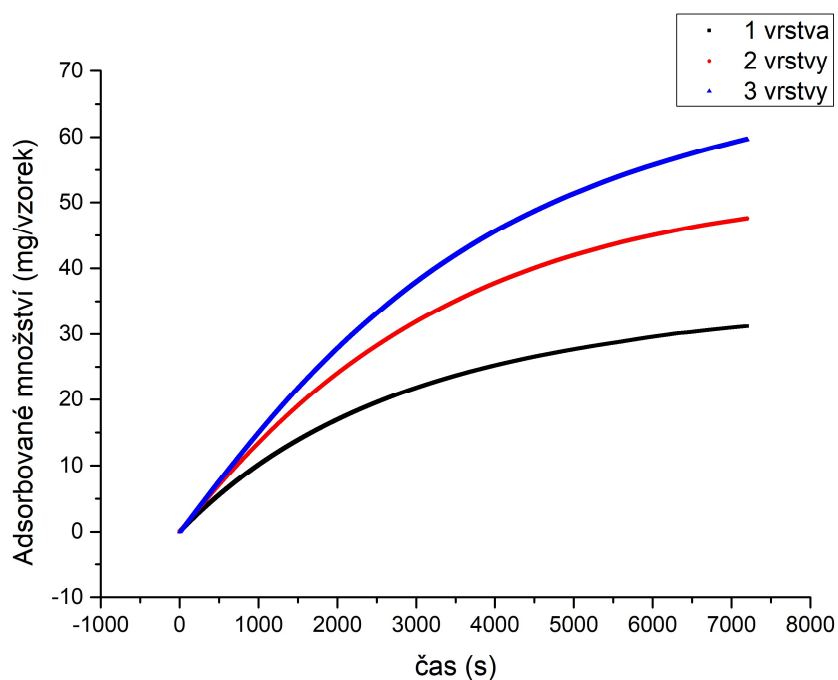


Obrázek 17: Porovnání průběhu adsorpce toluenu na vzorcích A, B a C při koncentraci 50 ppm a rychlosti proudění 8 cm/s

Z grafu je patrné, že jednotlivé vzorky vykazují rozdílnou adsorpční kapacitu. Nejvyšší hodnoty dosahuje vzorek B, následovaný vzorkem C, zatímco vzorek A vykazuje opět nejnižší adsorbované množství toluenu po celou dobu měření.

### Série měření různého počtu vrstev vzorku B

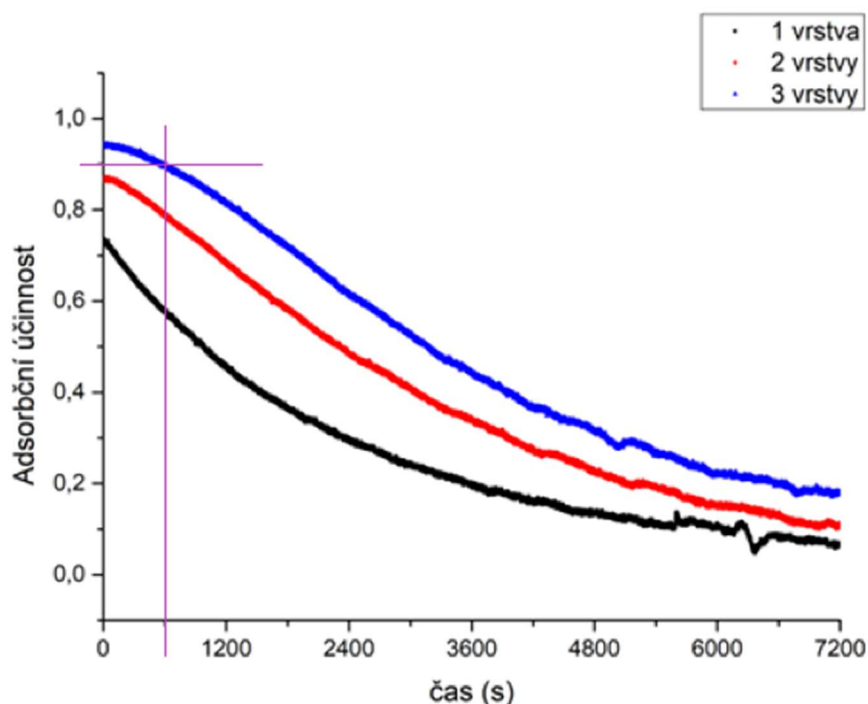
Následuje obrázek 18, který znázorňuje průběh adsorpce toluenu na počtu vrstev vzorku B při koncentraci toluenu 50 ppm a rychlosti proudění 8 cm/s.



Obrázek 18: Porovnání průběhu adsorpce toluenu na počtu vrstev vzorku B při koncentraci 50 ppm a rychlosti proudění 8 cm/s

Z grafu je patrné, že s rostoucím počtem vrstev vzorku B se zvyšuje adsorbované množství toluenu v čase. Všechny křivky mají typický průběh s rychlým počátečním nárůstem a následným zpomalením. Tento výsledek potvrzuje, že navýšení počtu vrstev adsorbentu vede ke zvýšení celkové adsorpční kapacity systému za daných podmínek.

Obrázek 20 znázorňuje adsorpční účinnost vzorku B v závislosti na počtu vrstev při stejných podmínkách, tedy vstupní koncentrace 50 ppm a rychlosti proudění 8 cm/s.



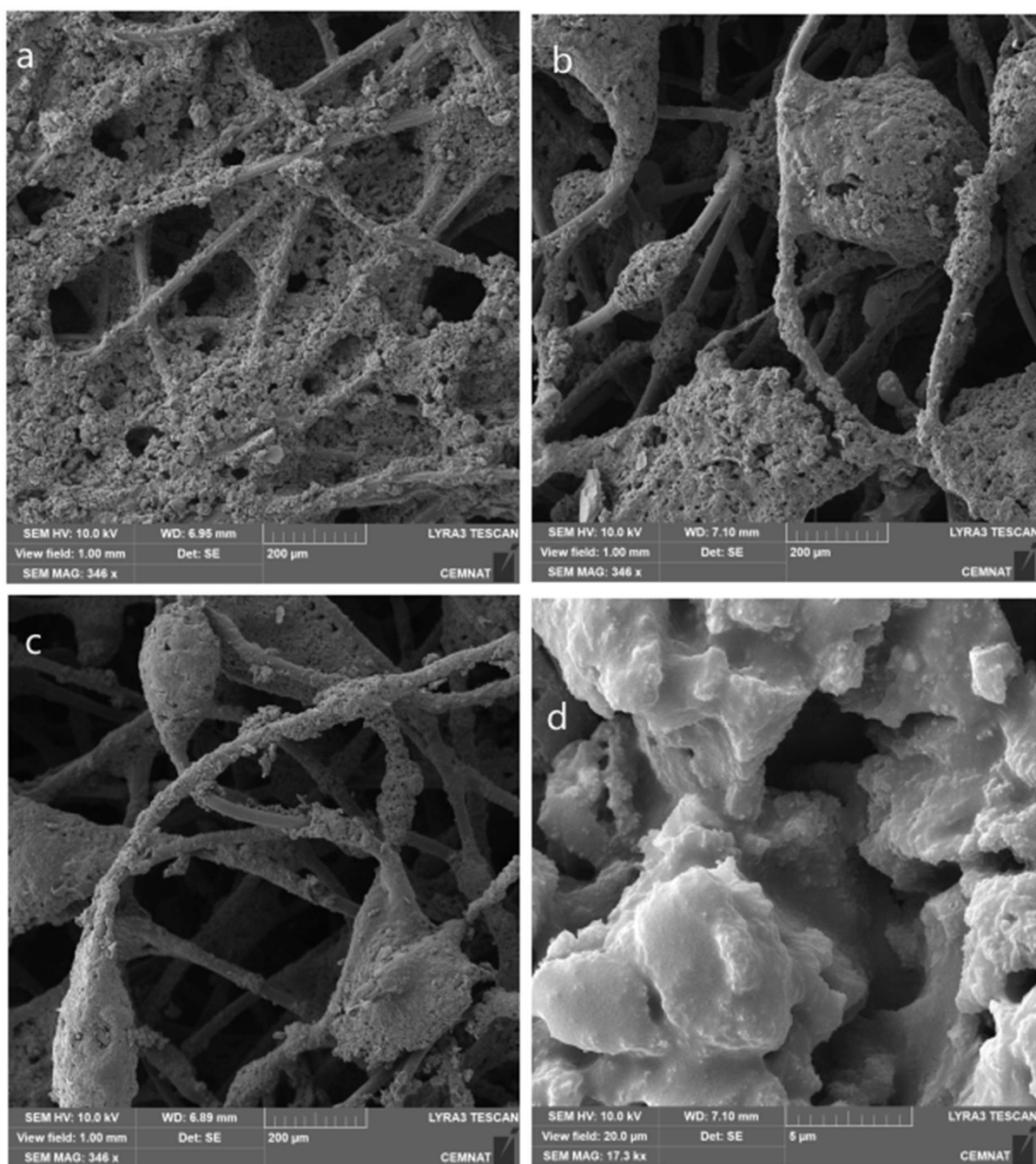
Obrázek 19: Adsorpční účinnost vzorku B při různém počtu vrstev

Z obrázku 19 je zřejmé, že s rostoucím počtem vrstev výrazně roste i adsorpční účinnost. Důležité je, že při použití tří vrstev byla dosažena adsorpční účinnost vyšší než 90 % a tato účinnost byla udržena po dobu 10 minut (ze zdrojových dat je účinnost adsorpce po 10 minutách 90,1 %). Tento výsledek je srovnatelný s literaturou [31].

Celkově obrázky 19 a 20 potvrzují, že zvýšení počtu vrstev aktivního uhlíkového vlákna významně zvyšuje jak celkovou adsorpční kapacitu, tak i adsorpční účinnost systému..

#### 4.5 Sekvenční elektronová mikroskopie

Na obrázku 21 jsou uvedeny snímky jednotlivých vzorků ze sekvenční elektronové mikroskopie, v jehož popisu je uveden vzorek a skutečná velikost ACF zachycená na snímku.



Obrázek 20: Snímky SEM; a - vzorek A; VF=1 mm, b - vzorek B; VF=1 mm, c - vzorek C; VF=1 mm, d - vzorek B; VF=20 μm

## 5 Závěr

Během této práce byl sestaven měřicí setup pro testování tenkých porézních vzorků pro adsorpci těkavých organických látek. Setup je navržen pro podmínky obvyklé v technologiích pro čištění vzduchu (čističek vzduchu, filtračních kartridží osobních filtrů, atd). Koncentrace těkavých látek od ~300 PPB po ~200 PPM a čelní rychlosti od jednotek po 30 cm/s. V měřicím setupu lze měřit do cca třech vrstev adsorbčního materiálu. Měřicí setup má dávkování těkavé látky s chybou menší než 3 % a regulaci a měření průtoku vzduchu s chybou 0,1 %. Přiváděný vzduch je vysušen na cca 5 % vlhkosti. Jsou měřeny důležité stavové veličiny teplota a vlhkost, koncentrace těkavých látek je měřena PID detektory se záznamem. Měření je možné provozovat do teploty 50°C.

Vlastní měření prokázalo lineární odezvu detektorů PID na koncentraci těkavé látky, byla vyvinuta metoda autokalibrace eliminující stárnutí a drift PID detektorů. Průběh měření adsorpce poskytuje kvalitní signál a umožňuje dobré numerické zpracování.

Vlastní měření adsorpce bylo zaměřeno na netkané materiály s aktivním uhlím ACF, zejména kvůli jejich slibným vlastnostem. Oproti granulovanému nebo práškovému aktivnímu uhlí vykazují při stejné adsorbční účinnosti výrazně nižší tlakovou ztrátu, dále rychlejší a snazší regeneraci termickou desorpčí. Pro měření jsme měli tři vzorky ACF s rozdílným obsahem aktivního uhlí.

Při kalibraci PID bylo potvrzeno, že jejich odezva na koncentraci těkavé organické látky je skutečně lineární, nicméně tato odezva může časem driftovat. Je tedy nutné provádět kalibraci detektorů pravidelně, nebo přistoupit na autokalibraci.

Měření různých vzorků ACF textilie firmy nonwoven, vzorků A, B a C, bylo zjištěno, že pro průmyslové použití, zejména v systémech s vysokou koncentrací VOC, je vzorek A nevhodný, protože nedisponuje dostatečnou adsorpční kapacit a během termické regenerace by se rozkládal již při teplotách do 150 °C a měl rovněž nejvyšší tlakovou ztrátu.

Jedinými vlastnostmi, které mohou hovořit ve prospěch vzorku A je jeho nejnižší tloušťka z důvodu kompaktnosti v systémech, ve kterých je zapotřebí minimalizovat rozměry dalším důvodem může být také pořizovací cena, která v této práci není zkoumána.

U všech vzorků bylo potvrzeno, že jakožto adsorbenty, vykazují při adsorpci dynamickou rovnováhu, tedy při jejich nasycení při určité koncentraci VOC, jsou schopny dále adsorbovat v případě, že se okolní koncentrace VOC zvýší například důvodem nehody.

Vzorky B a C jsou vhodné z pohledu tlakové ztráty, kde nepatrný rozdíl mluví ve prospěch vzorku C a nepopíratelnou výhodou je také jejich afinita zejména k polárním VOC.

U vzorku B lze konstatovat, že při vrstvení lze dosáhnout zvýšení adsorpční účinnosti, a to do té míry, kdy již při třech vrstvách je tato účinnost udržena nad hodnotou 90 % celých 10 minut, což je klíčové zejména v oblastech použití, při kterých je potřeba krátkodobě zachytávat VOC, například v plynových maskách nebo pro návrh čističky vzduchu s regenerací náplně.

Závěrem lze říci, že vyvinutý setup je vhodný pro analýzu vrstevnatých adsorbčních materiálů v rozsahu koncentrací a rychlostí běžných pro aplikace jako jsou například čističky vzduchu a osobní ochranné prostředky dýchacích cest. Provedená měření ukázala základní trendy ovlivňující adsorbční účinnost a kapacitu v závislosti na koncentraci VOC, rychlosti proudícího média a typu těkavé látky. Na základě srovnávacích měření byl ze třech průmyslově vyráběných ACF netkaných adsorbčních materiálů vybrán vhodný kandidát, který byl dále charakterizován vhodnými instrumentálními technikami. Z vybraného materiálu B byl sestaven a testován vrstvený filtr, který dosáhl srovnatelných výsledků s literaturou.

## Literatura:

1. KOTZIAS, Dimitrios. Built environment and indoor air quality: The case of volatile organic compounds. *AIMS Environmental Science*, 2021, 8.2: 135-147.
2. MAUNG, Tun Z., et al. Indoor air pollution and the health of vulnerable groups: a systematic review focused on particulate matter (PM), volatile organic compounds (VOCs) and their effects on children and people with pre-existing lung disease. *International journal of environmental research and public health*, 2022, 19.14: 8752.
3. AN, Y.; ZHANG, J. S.; SHAW, C. Y. Measurements of VOC adsorption/desorption characteristics of typical interior building materials. *Hvac&R Research*, 1999, 5.4: 297-316.
4. HODGSON, Alfred T. Indoor volatile organic compounds: Influences of ozone and reactions with surfaces. *Environmental Science & Technology*. 2002, 36(15), s. 329A–338A. DOI: 10.1021/es0220280.
5. SALTHAMMER, Tunga; MENTUHLER, Klaus; MARUTZKY, Rainer. Formaldehyde in the Indoor Environment. *Chemical Reviews*. 2010, 110(4), s. 2536–2572. DOI: 10.1021/cr800399g.
6. WESCHLER, Charles J. Changes in indoor pollutants since the 1950s. *Atmospheric Environment*. 2009, 43(1), s. 153–169. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.044.
7. ZHANG, Yingjun; MOHAMED, Mohamed F.; HEITZMAN, Brian D.; et al. Volatile organic compound emissions from engineered wood products: A review of measurement protocols and data interpretation challenges. *Indoor Air*. 2017, 27(1), s. 20–35. DOI: 10.1111/ina.12311.
8. KIM, Kyung Hwa; JANG, Hyeonju; KIM, Hye Jin; et al. A review of major volatile organic compounds emitted from building materials: Emission characteristics and health impacts in indoor environments. *Environmental International*. 2019, 123(1), s. 567–581 DOI:10/1016/envint/123456.
9. WOLKOFF, Peder; KJÆRGAARD, Søren K. The dichotomy of relative humidity on indoor air quality. *Environmental International*. 2013, 49(1), s. 88–98. DOI: 10.1016/j.envint.2012.08.002.
10. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Benzene – IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 100F [online]. Lyon: International Agency for Research on Cancer (IARC), World Health Organization (WHO),

2012 [citováno dne: aktuální datum]. Dostupné z: <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono100F-24.pdf>.

11. Ruthven, D. M. (1984). *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. Wiley.
12. Gregg, S. J., & Sing, K. S. W. (1982). *Adsorption, Surface Area and Porosity*. Academic Press.
13. Dabrowski, A. (2001). Adsorption—From theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, 93(1–3), 135–224.
14. Atkins, P., & De Paula, J. (2017). *Physical Chemistry*. Oxford University Press.
15. Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361–1403.
16. Freundlich, H. M. F. (1906). Over the adsorption in solution. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 57, 385–470.
17. Kazmi, S., & Singh, S. P. (2005). Adsorption of volatile organic compounds using activated carbon.
18. Szostak, R. (1998). *Molecular Sieves: Principles of Synthesis and Identification*. Springer Science & Business Media.
19. Iler, R. K. (1979). *The Chemistry of Silica*. John Wiley & Sons
20. Saha, B., et al. (2005). "Adsorption of volatile organic compounds on activated carbon." *Journal of Hazardous Materials*, 118(1-3), 71–76.
21. Pelekani, C., & Snoeyink, V.L. (1999). "Competitive adsorption in natural water: Role of activated carbon pore size." *Water Research*, 33(5), 1209–1219.
22. Kopecky, J. "Activated Carbon-Technology for Dribling and Swimming Water Treatment." *VODNI HOSPODARSTVI* 53.7 (2003): 185-191.
23. Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon*. Elsevier.
24. Pitter, P. (1999). *Hydrochemie*. VŠCHT Praha.
25. Newcombe, G., et al. (2006). "Adsorption of natural organic matter onto activated carbon: Electrostatic and non-electrostatic effects." *Carbon*, 44(4), 586–592.
26. Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). "Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1966–2005.

27. BUBEN, Martin. Eliminace těkavých organických látek z provozu lakovací linky PRIMAG společnosti INOTECH ČR sro, Tachov. 2013.
28. Dolejš, P., et al. (2011). *Role adsorpce na aktivním uhlí v současném vodárenství*. Sborník konference PV Tábor 2011.
29. Wang, J., & Kaskel, S. (2020). "Kinetics and performance of activated carbon fiber filters for VOC removal." *Environmental Science & Technology*, 54(4), 2345–2353.
30. BALANAY, Jo Anne G.; OH, Jonghwa. Adsorption characteristics of activated carbon fibers in respirator cartridges for toluene. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18.16: 8505.
31. Summers, M. (2022): Determination of Activated Carbon Fiber Adsorption Capacity for Several Common Organic Vapors: Application for Respiratory Protection. *Journal of the Air & Waste Management Association*. DOI: [10.1080/10962247.2021.1985013](https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1985013).
32. Zhang, L., Shen, D., Luo, K.H. (2020): Adsorption and Desorption of VOCs on Activated Carbon Fibers Under Dynamic Conditions. *Journal of Hazardous Materials*. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2020.122891](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122891).
33. Bronkhorst High-Tech B.V., EL-FLOW Base Mass Flow Controllers for Gases, Technical Datasheet, dostupné online: [www.bronkhorst.com](http://www.bronkhorst.com).
34. Nonwovenn. *Technical Data Sheet: Product Code 3390*. [online]. Dostupné z obrázku: [https://pplx-res.cloudinary.com/image/upload/v1741660910/user\\_uploads/YlXmvWjTdmYxLXL/1002186415.jpg](https://pplx-res.cloudinary.com/image/upload/v1741660910/user_uploads/YlXmvWjTdmYxLXL/1002186415.jpg)
35. Nonwovenn. *Technical Data Sheet: Product Code 3354*. [online]. Dostupné z obrázku: [https://pplx-res.cloudinary.com/image/upload/v1741662211/user\\_uploads/gluRyZlBhWBCjvO/1002186448.jpg](https://pplx-res.cloudinary.com/image/upload/v1741662211/user_uploads/gluRyZlBhWBCjvO/1002186448.jpg)
36. Nonwovenn. *Technical Data Sheet: Product Code 3352*. [online]. Dostupné z obrázku: [https://pplx-res.cloudinary.com/image/upload/v1741662187/user\\_uploads/WQgRBZqasKvvDuo/1002186447.jpg](https://pplx-res.cloudinary.com/image/upload/v1741662187/user_uploads/WQgRBZqasKvvDuo/1002186447.jpg)
37. Brunauer, S., Emmett, P. H., Teller, E. *Adsorption of gases in multimolecular layers*. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 1938, 60(2), 309–319. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>

38. Reimer, L. *Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis*. Springer-Verlag, 1998.
39. Ligotski, R., Sager, U., Schneiderwind, U., Asbach, C. and Schmidt, F., (2019). Prediction of VOC adsorption performance for estimation of service life of activated carbon based filter media for indoor air purification. *Building and Environment*, 149, pp.146-156.
40. Angus Shiue, Shih-Cheng Hu (2012): *Adsorption Kinetics for the Chemical Filters Used in the Make-Up Air Unit (MAU) of a Cleanroom*, *Separation Science and Technology*, 47:4, 577-583, DOI: 10.1080/01496395.2011.619613