



Adsorpce a desorpce u aktivního uhlí v závislosti na teplotě

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Jan Novák**
Vedoucí práce: prof. Ing. Karel Fraňa, Ph.D.





Zadání diplomové práce


Adsorpce a desorpce u aktivního uhlí v závislosti na teplotě

Jméno a příjmení: Bc. Jan Novák
Osobní číslo: S16000327
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce strojů a zařízení
Zadávací katedra: Katedra energetických zařízení
Akademický rok: 2017/2018

Zásady pro vypracování:

Práce řeší problematiku šíření znečišťujících látek v prostředí.

1. Zpracování dosavadních teoretických poznatků a možnosti CFD v této problematice.
2. Sestavení jednoduchého modelu a odzkoušení na zdravotně nezávadných látkách (CO₂).
3. Odzkoušení měřících technik a vyhodnocení měření.
4. Výsledky budou studentem minimálně jednou publikovány na workshopu nebo semináři, než bude téma obhájeno u závěrečné státní zkoušky.


Prof. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry




Prof. Dr. Ing. Petr Janáček
ředitel

V Liberci, dne 2018

Rozsah grafických prací: do 20 stran
Rozsah pracovní zprávy: max. 50 stran
Forma zpracování práce: tištěná



Seznam odborné literatury:

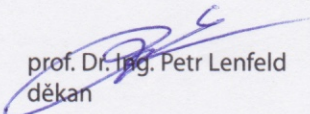
- [1] BURROUGHS, H. E. a Shirley J. HANSEN. *Managing indoor air quality*. 5th ed. Boca Raton, FL: Distributed by Taylor & Francis, c2011. ISBN 9781439870143.
- [2] LI, Angui, Yingxin ZHU a Yuguo LI, ed. *Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, Volume 1: Indoor and Outdoor Environment* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014 [cit. 2019-04-26]. Lecture Notes in Electrical Engineering. DOI: 10.1007/978-3-642-39584-0. ISBN 978-3-642-39584-0.
- [3] MURAKAMI, Shuzo, Shinsuke KATO a Jie ZENG. Numerical simulation of contaminant distribution around a modeled human body: CFD study on computational thermal manikin – Part II. *ASHRE Transaction*, 1998. 104-2, pp. 226-233.

Vedoucí práce: prof. Ing. Karel Fraňa, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Konzultant práce: Ing. Tomáš Kořínek
Katedra energetických zařízení

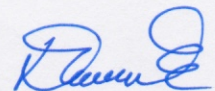
Datum zadání práce: 1. února 2018

Předpokládaný termín odevzdání: 1. srpna 2019


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

V Liberci 28. února 2018




doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

28. 4. 2019



Bc. Jan Novák

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Karlu Fraňovi, Ph.D. za pomoc při vedení diplomové práce. Také děkuji Ing. Tomáši Kořínkovi za pomoc s provedením a vyhodnocením experimentu.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže Technické univerzity v Liberci č. SGS 21227, využívající účelové podpory na specifický vysokoškolský výzkum a je financovaná Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá adsorpcí a desorpcí oxidu uhličitého (CO₂) ve vzduchu na aktivním uhlí při různých teplotách. Aktivní uhlí bylo ve formě monolitu. Vzduch proudil skrz monolit a CO₂ byl zachytáván a opět uvolňován v závislosti na měnící se teplotě. Změna teploty monolitu byla provedena elektrodovým zahříváním pomocí metody ESA (Electric Swing Adsorption). Byly zkoumány dva experimenty dané odlišnými podmínkami.

KLÍČOVÁ SLOVA

Adsorpce, desorpce, aktivní uhlí, monolit, oxid uhličitý, vzduch, experiment, elektroda

ABSTRACT

This thesis deals with adsorption and desorption of the carbon dioxide (CO₂) in air in an activated carbon under different temperatures. The activated carbon was in a monolith form. The air flowed through the monolith and CO₂ was captured and released again depending on the changing temperature. In order to control the temperature of the monolith, the electrode heating was carried out using the ESA (Electric Swing Adsorption) method. There were examined two experiments given by the slightly different conditions.

KEY WORDS

Adsorption, desorption, activated carbon, monolith, carbon dioxide, air, experiment, electrode

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Označení	Jednotky	Název
A	$[m^3 mol^{-1} s^{-1}]$	předexponenciální faktor v Arrheniově rovnici
a	$[mol kg^{-1}]$	adsorbované množství
a_m	$[mol kg^{-1}]$	množství potřebné k úplnému pokrytí povrchu monovrstvou
b	$[Pa^{-1}]$	poměr adsorpční a desorpční konstanty
C	$[-]$	konstanta adsorpčního a kondenzačního tepla adsorbátu v první vrstvě
c_g	$[mol m^{-3}]$	koncentrace adsorptivu v nosném plynu
E_d	$[J mol^{-1}]$	aktivační energie v Arrheniově rovnici
I	$[A]$	elektrický proud
k_{fr}	$[-]$	konstanta Freundlichovy izotermy
k_a	$[Pa^{-1} m^{-2} s^{-1}]$	rychlostní konstanta adsorpce
k_d	$[m^{-2} s^{-1}]$	rychlostní konstanta desorpce
m	$[-]$	kinetický řád adsorpce
N	$[-]$	počet tvořících se vrstev
n	$[-]$	kinetický řád desorpce
n_{fr}	$[-]$	konstanta Freundlichovy izotermy
p	$[Pa]$	tlak
Q	$[J]$	teplo
R	$[J K^{-1} mol^{-1}]$	molární plynová konstanta
$r_{a,d}$	$[m^{-2} s^{-1}]$	rychlost adsorpce, desorpce
s	$[-]$	pravděpodobnost ulpění částice
T	$[K]$	teplota
t	$[s]$	čas
U	$[V]$	elektrické napětí
δ	$[-]$	relativní posunutí mezi teplotou a koncentrací
θ	$[-]$	podíl obsazeného povrchu

OBSAH

Úvod.....	9
1 Adsorpce.....	11
1.1 Směsi.....	11
1.1.1 Difuze.....	12
1.1.2 Difuzní separační procesy.....	12
1.2 Co je adsorpce.....	12
1.2.1 Princip adsorpce.....	13
1.2.2 Teplotně programované techniky.....	16
1.2.3 Rychlost adsorpce a desorpce.....	16
1.3 Adsorpční izotermy.....	17
1.3.1 Freundlichova adsorpční izoterma.....	17
1.3.2 Langmuirova adsorpční izoterma.....	18
1.3.3 Izoterma B.E.T.....	20
1.4 Způsoby regenerace materiálu.....	21
2 Aktivní uhlí.....	23
2.1 Vlastnosti adsorbentu.....	23
2.2 Výroba aktivního uhlí.....	24
2.3 Vlastnosti aktivního uhlí.....	25
2.3.1 Porozita.....	25
2.3.2 Struktura.....	26
2.3.3 Chemické vlastnosti.....	27
2.4 Další používané adsorbenty.....	27
2.4.1 Zeolit.....	27
2.4.2 Silikagel.....	28
3 Využití simulačních systémů ve zkoumání adsorpce.....	29
4 Experiment.....	31
4.1 Návrh elektrod.....	31
4.1.1 Prohřívání monolitu.....	33
4.1.2 Prohřívání monolitu elektrodou č. 1.....	35
4.1.3 Prohřívání monolitu elektrodou č. 2.....	37
4.1.4 Prohřívání monolitu elektrodou č. 3.....	38

4.1.5	Výběr typu elektrody pro experiment	39
4.2	<i>Příprava experimentu</i>	40
4.3	<i>Průběh a výsledky měření</i>	43
4.3.1	První experiment	43
4.3.2	Druhý experiment	50
4.3.3	Porovnání výsledků obou experimentů	56
4.4	<i>Popis vývoje koncentrace CO₂ v závislosti na teplotě</i>	56
	Závěr	60
	Seznam použité literatury	62
	Seznam příloh	64
	Přílohy	64

ÚVOD

S neustále se zvyšující životní úrovní a technickou vyspělostí naší společnosti přichází i požadavek na vyšší kvalitu životního prostředí. Jedním z problémů, kterým je nutné se věnovat, jsou emise oxidu uhličitého, které ve zvýšené míře mohou ovlivňovat nejen globální jevy, ale také přímo kvalitu lidského života. Předmětem výzkumů proto dnes je, jak co nejefektivněji oxid uhličitý snižovat – ve spalínách aut a továren, ale i v obytných a lidmi využívaných místnostech.

Toto nabývá na důležitosti např. ve vzdělávacích institucích, jako jsou základní či mateřské školy, kde oxid uhličitý sice při zvýšených koncentracích není životu nebezpečný, ale má přímý vliv na vnímání a soustředěnost. Tím je následně ovlivněna i kvalita vzdělání přítomných žáků. Problém koncentrace CO_2 se navíc v takovýchto budovách zvyšuje se zvyšováním tepelné izolace vnější obálky budov. Koncentrace se sice dá snižovat přívodem čerstvého venkovního vzduchu, ovšem z hlediska energetické úspory je toto nežádoucí. Otázka aktivní kontroly koncentrace oxidu uhličitého v budovách je tak velmi důležitá.

Jedním ze způsobů, jak toho docílit, je oxid uhličitý zachytit. Předmětem zkoumání této práce je fyzikálně chemický jev zvaný adsorpce, díky kterému je možné čistit směsi plynů a látek, od nežádoucích částic. Při adsorpci jsou částice oxidu uhličitého či jiného plynu zachytávány na povrchu jiného, většinou pevného materiálu. Společně s adsorpcí je nutné řešit i jev opačný, tzn. zpětné uvolňování již zachycených částic tak, aby se materiál, na který jsou částice zachytávány, zregeneroval.

Tato práce má za cíl popsat adsorpci a desorpci oxidu uhličitého na monolitu aktivního uhlí v závislosti na teplotě. Adsorpční a desorpční chování monolitu je testováno experimentálně. Za tímto účelem byl navržen a zkonstruován experimentální ověřovací model.

Cílem první kapitoly je seznámit čtenáře s jevem adsorpce jako takovým. V krátkosti je nastíněno chemické a fyzikální pozadí adsorpce. Následně je vysvětleno, jaké typy adsorpce jsou, a jak fungují. Také je vysvětlen jev opačný – desorpce. V kapitole je také uvedeno, jaké matematické rovnice se pro popis adsorpce využívají. Poslední část této kapitoly potom pojednává o způsobech regenerace materiálu, na kterém probíhala adsorpce.

Cílem druhé kapitoly je přiblížení aktivního uhlí jako velmi častého adsorbentu. Nejprve jsou rozebrány základní požadavky na adsorbent, a jeho vlastnosti. Poté je čtenář seznámen se způsobem výroby aktivního uhlí a jeho vlastnostmi. V závěru jsou zmíněny další užívané adsorbenty a jejich základní vlastnosti a využití.

Cílem třetí kapitoly je nastínit možnosti využití simulačních systémů v problematice adsorpce a desorpce. Je popsáno, z čeho tyto systémy vycházejí a na čem závisí.

Cílem čtvrté kapitoly je experimentálně stanovit chování adsorpce CO₂ při zahřívání a ochlazování monolitu aktivního uhlí. Nejprve je uvedena příprava experimentu. Následně je proveden experiment, který proběhl dvakrát s odstupem pěti měsíců. Oba experimenty jsou rozebrány a porovnány. V kapitole je dále detailně popsáno adsorpční a desorpční chování během experimentu.

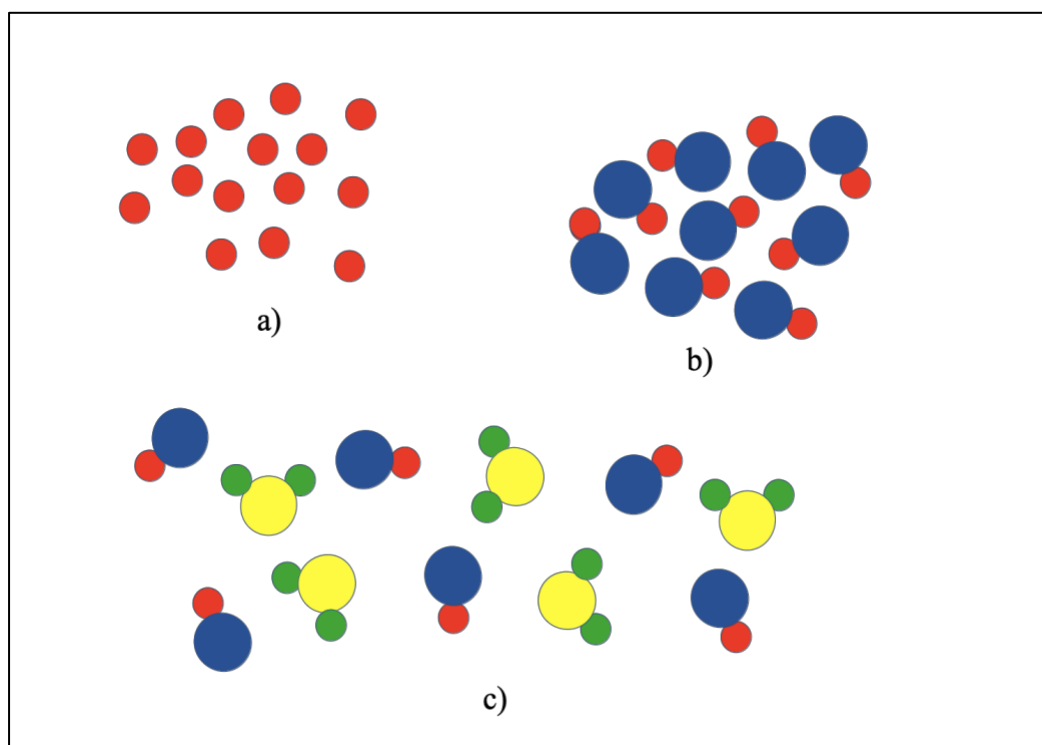
1 ADSORPCE

Tato kapitola se zabývá teorií adsorpčního procesu, *podkapitola 1.1* se však nejprve věnuje tématu směsí, a lehce nastiňuje téma difuze, což s adsorpcí přímo souvisí.

1.1 SMĚSI

V technických odvětvích, zejména těch, která se týkají energetického inženýrství nebo chemie, se na místo chemicky čistých látek mohou uplatnit směsi. Chemicky čistá látka je látka, která je v celém objemu tvořena stejným druhem atomů (prvek), nebo stejným druhem molekul (sloučenina). Směs je pak látka, která je tvořena dvěma či více chemicky čistými látkami, přičemž při jejich smísení nedochází ke změně ve stávajících chemických vazbách směřovaných látek, ani nevznikají chemické vazby nové. Významně se ale mění fyzikální vlastnosti směsi, jako jsou teplota varu a tání, oproti původním látkám [1].

Vše je podrobněji vysvětleno na *obrázku 1.1*. Na *obrázku 1.1a* je znázorněna chemicky čistá látka složená z atomů jednoho prvku. Na *obrázku 1.1b* je znázorněna chemicky čistá látka složená ze stejných molekul – sloučenina. Na *obrázku 1.1c* je znázorněna směs ze dvou typů molekul, molekuly však vůči sobě nejsou chemicky vázány, jsou pouze promíseny.



Obrázek 1.1 a) atomy prvku, b) molekuly, c) směs

Někdy směs vznikne bez předchozího záměru, a je potřeba ji upravit. Snahou pak je nějakou složku oddělit, nebo alespoň snížit její koncentraci. Některé podíly směsi mohou totiž být nepotřebné, nebo dokonce škodlivé. Velmi časté je čištění vzduchu od škodlivin, a kapalin vypouštěných do vodních toků [2].

Základním procesem, díky kterému lze oddělovat složky směsi od sebe, je difuze. Procesy, při nichž dochází k separaci složek směsi transportem ve fázových rozhraních se nazývají difuzní separační procesy. Tento transport se pak nazývá sdílení hmoty [3].

1.1.1 DIFUZE

U nerovnovážných soustav dochází ke snaze systému vyrovnat místní rozdíly. Systém se tak postupně dostává do stavu větší a větší rovnováhy. V případě, že je v systému v nerovnováze koncentrace (např. se systém skládá ze dvou různých fází), dochází k transportu molekul. Cílem systému je vyrovnat svou koncentraci. Tento jev se nazývá difuze [2], [4].

1.1.2 DIFUZNÍ SEPARAČNÍ PROCESY

Jedním z difuzních separačních procesů je adsorpce. Ta je podrobněji rozebrána v dalších částech kapitoly. Dalším procesem je absorpce, což je proces pohlcování látky absorbátu do objemu absorbentu (plyn se pohlcuje do kapaliny). Opačným procesem je desorpce. Mezi další procesy se řadí destilace, extrakce, vyluhování, srážení apod. U všech těchto procesů dochází nějakým způsobem k transportu hmoty na rozhraních s rozdílnými vlastnostmi. Tato rozhraní jsou buď fázová nebo jsou to rozhraní látek stejné fáze, ale rozdílných vlastností.

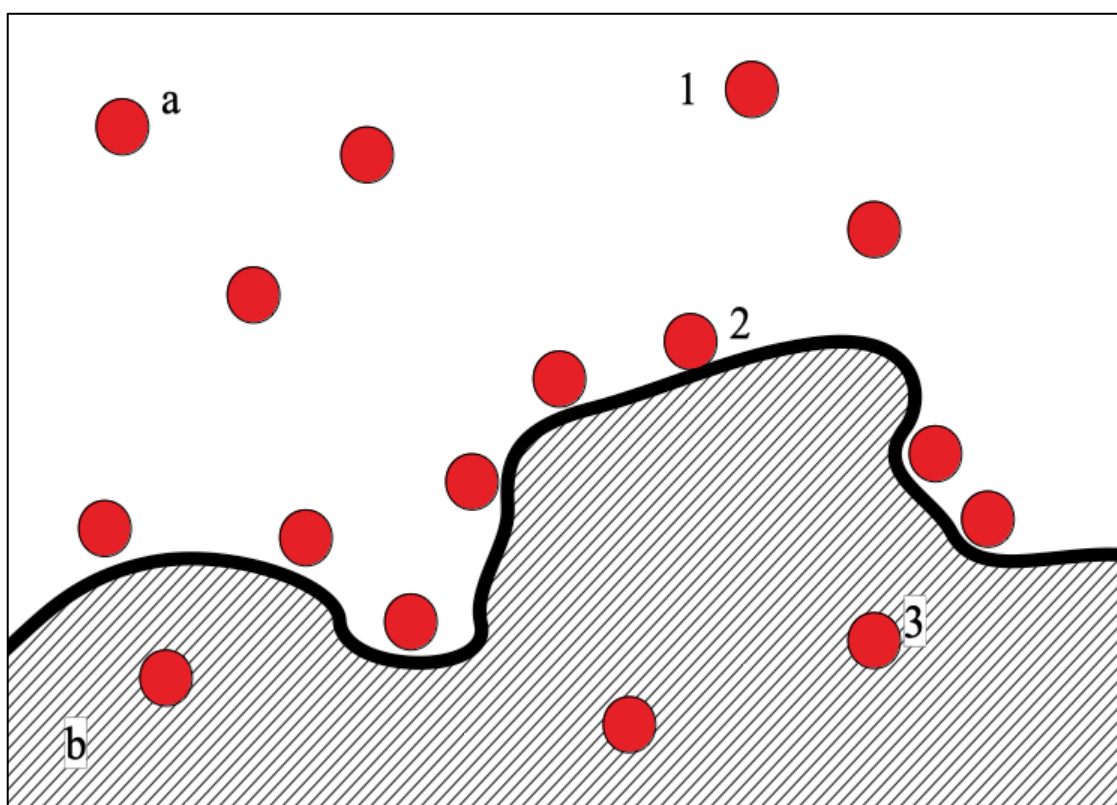
1.2 CO JE ADSORPCE

Adsorpce je jev, který vzniká na fázových rozhraních. Fázové rozhraní je z hlediska mezimolekulárních sil nevyvážené. Jestliže je alespoň jedna z fází plynná nebo kapalná, tak dochází na rozhraní fází ke zvýšení koncentrace plynné nebo kapalné fáze. To vede ke snížení energie na fázovém rozhraní. Při adsorpci jsou tedy molekuly plynu nebo kapaliny vázány k pevnému povrchu.

Látka s potenciálem být adsorbována se nazývá adsorptiv. Látka, která je k povrchu již vázána – adsorbována, se nazývá adsorbát. Pevná látka, na niž dochází k adsorpci, je adsorbent [5]. Tato látka má obvykle velmi porézní povrch [2]. Pokud dochází současně k adsorpci a

absorpci, tzn. část molekul je zachytávána na povrchu látky, a část proniká dovnitř, celý proces se nazývá sorpce. Zachytávaná látka se pak nazývá sorbát, a látka, která zachytává je sorbent. Proces opačný k adsorpci se nazývá desorpce. Při desorpci jsou adsorbované molekuly plynu z povrchu pevné látky uvolňovány.

Adsorpce je prakticky znázorněna na obrázku 1.2. Obrázek 1.2a znázorňuje částice zachytávaného plynu - adsorbát, obrázek 1.2b znázorňuje pevnou látku – adsorbent. V situaci (1) se částice plynu volně pohybuje v prostoru, v situaci (2) je částice adsorbována na povrchu pevné látky, v situaci (3) je částice difundována do pevné látky [2].

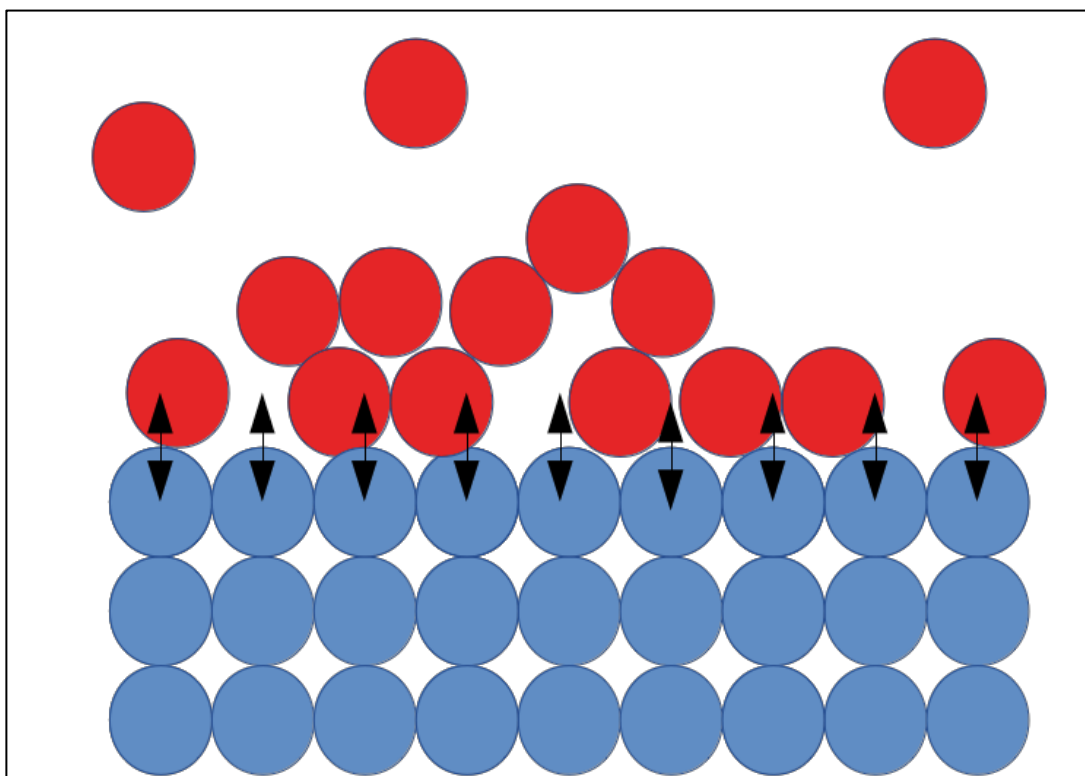


Obrázek 1.2 Zjednodušené znázornění adsorpce částic plynu na povrchu pevné látky.

1.2.1 PRINCIP ADSORPCE

Při adsorpci jsou molekuly plynu vázány k povrchu pevné látky pomocí mezipovrchových přitažlivých sil [4], [6]. Charakter těchto sil však může být různý, a podle toho se dělí i adsorpce. Prvním typem je fyzikální adsorpce (někdy také nazývaná jako fyziosorpce). U tohoto typu jsou k sobě částice na fázovém rozhraní navzájem vázány pomocí Van der Waalsových sil. Tyto síly mají dlouhý dosah, ale jsou slabé. Energie, která se uvolňuje při tomto typu adsorpce, je řádově

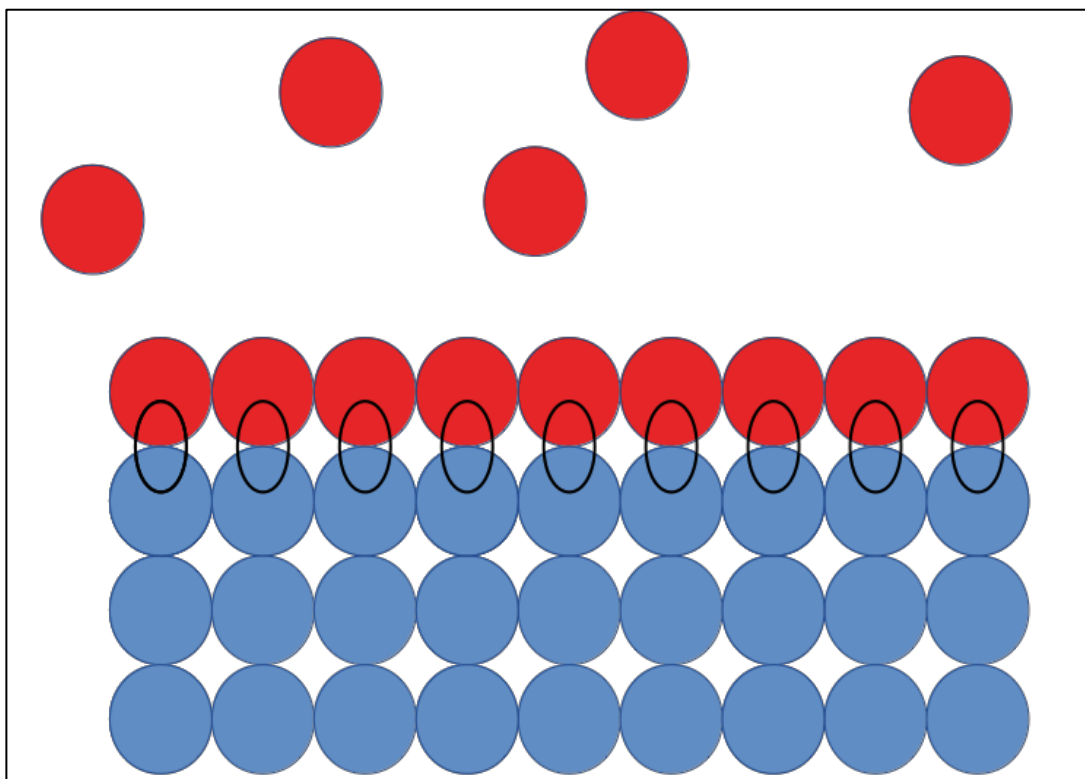
stejně veliká, jako kondenzační entalpie. Tato adsorpční entalpie se pohybuje řádově v desítkách kJ/mol. Taková hodnota entalpie není dostatečně velká, aby přerušila vazby v molekule, proto u tohoto typu nedochází k přenosu ani sdílení elektronů mezi molekulami adsorbentu a adsorbátu. Fyzikální adsorpce je díky tomu vratná. Pokud je zvýšena teplota nebo snížen tlak, dojde k uvolnění vazby a adsorbovaná látka uniká. Adsorbent je tímto způsobem možné regenerovat – dochází k desorpci. Na povrchu adsorbentu se může tvořit více vrstev adsorbátu [2], [5], [6]. Fyzikální adsorpce je znázorněna na *obrázku 1.3*.



Obrázek 1.3 Fyzikální adsorpce – adsorbát je k adsorbentu vázán Van der Waalsovými silami, může tvořit více vrstev adsorpce.

Dalším typem adsorpce je chemická adsorpce (zkráceně chemisorpce). Při chemisorpci dochází mezi adsorbentem a adsorbátem ke sdílení nebo přenosu elektronů. Molekuly adsorbentu a adsorbátu tak tvoří většinou kovalentní vazby na místech povrchu adsorbentu, kde je to možné. Vazebné síly jsou tak výrazně silnější. Rovněž adsorpční entalpie dosahuje vyšších hodnot, řádově se jedná o stovky kJ/kmol. Pro případnou desorpci by bylo potřeba výrazně vyšších teplot. Adsorbovaná molekula může být v tomto případě roztržena, a při desorpci tak uniká pouze její část. Desorbovaná látka se tedy od adsorbované často liší, a proto desorpce do

původního stavu většinou není možná. Díky tvorbě chemických vazeb vytváří adsorbát na povrchu pevné látky vždy jen jednu vrstvu (monovrstvu) [2, 5, 6]. Chemisorpce je znázorněna na *obrázku 1.4*. V *tabulce 1.1* je přehledné porovnání základních vlastností a charakteristik fyzikální adsorpce a chemisorpce.



Obrázek 1.4 Chemisorpce – adsorbát je k povrchu vázán chemickými vazbami, na povrchu tvoří monovrstvu.

Tabulka 1.1 Porovnání vlastností a charakteristik fyzikální adsorpce a chemisorpce [7]		
vlastnost	fyzikální adsorpce	chemisorpce
charakter adsorbované vrstvy	monovrstva, vícenásobná vrstva	monovrstva
charakter vzájemného působení	van der Waalovy síly	sdílení elektronů, tvorba chemických vazeb
kinetika ustalování rovnováhy	vysoká, proces obvykle není aktivovaný	nízká, se vzrůstající teplotou exponenciálně roste, vykazuje významnou aktivační energii
desorpce	snadná a vratná, snížením tlaku nebo zvýšením teploty	obtížná a často nevratná, obvykle nutné zvýšit teplotu systému, a to někdy i velmi výrazně (i více než na 400 °C)
rozsah adsorbovaného množství	vysoké	dáno počtem adsorpčních center, omezené

1.2.2 TEPLOTNĚ PROGRAMOVANÉ TECHNIKY

Jsou to techniky založeny na sledování rychlosti fyzikálně chemických procesů v závislosti na teplotě. Teplota je určeným způsobem měněna v čase. Dle procesu, který ve sledovaném systému probíhá, rozlišujeme teplotně programovanou redukci, oxidaci, povrchovou reakci a desorpci. Teplotně programovaná desorpce se používá k výzkumu adsorpce a adsorpčních center na povrchu adsorbentů.

Teplotně programovanou desorpci lze provádět dvěma způsoby. První způsob je staticky vakuový. Ten se používá např. pro výzkum čistých krystalografických rovin. Druhý způsob je průtokový za atmosférického tlaku, který se používá pro práškové a porézní materiály. Zásadní rozdíl mezi oběma metodami je ten, že u průtokového způsobu je nutné uvažovat readsorpci (opětovná adsorpce již jednou adsorbovaných a desorbovaných částic). U obou metod je nejprve adsorbováno určité množství. Slabě vázané molekuly jsou následně odstraněny. Poté se začne zvyšovat teplota. Dle změny koncentrace adsorbované látky v protékajícím plynu, či změny tlaku ve vakuové komoře se určují výsledky. Při změně teploty dochází ke změně rychlosti desorpce, což se projevuje nárůstem či poklesem koncentrace, respektive tlaku uvolňovaných látek [7].

1.2.3 RYCHLOST ADSORPCE A DESORPCE

Rychlost adsorpce, tedy rychlost, jakou je povrch pevné látky pokrýván částicemi plynu, závisí na schopnosti pevné látky disipovat energii narážející částice na tepelnou energii. Nemá-li sorbent tuto schopnost dostatečnou, částice, která narazí na povrch, se po povrchu pohybuje, a může se po několika nárazech opět vrátit do plynné fáze. Podíl nárazů, které vedou k ulpění částice na povrchu, vůči celkovému podílu nárazů, se nazývá pravděpodobnost ulpění.

$$s = \frac{\text{rychlost adsorpce částic na povrchu}}{\text{rychlost nárazů částic na povrch}} \quad (1.1)$$

Rychlost nárazů částic na povrch lze určit z kinetického modelu, rychlost adsorpce částic na povrchu je třeba stanovit experimentálně. Pokud je např. $s < 0,1$, znamená to, že k zachycení jedné částice plynu je potřeba minimálně 10 nárazů.

K aktivaci desorpce je vždy zapotřebí určité aktivační energie. Aktivační energie je srovnatelná se změnou entalpie po adsorpci. U chemisorpce je aktivační energie vyšší než u fyzikální adsorpce. Závislost rychlosti desorpce na teplotě je obsažena v Arrheniově rovnici,

$$k_d = A_d \cdot e^{-\frac{E_d}{RT}} \quad (1.2)$$

ze které dostáváme rychlostní konstantu desorpce k_d . V rovnici je A_d předexponenciální faktor Arrheniovy rovnice (vycházíme z předpokladu, že rychlostní konstanta se řídí touto rovnicí), E_d je aktivační energie pro desorpci, R je molární plynová konstanta a T je termodynamická teplota.

Budeme-li uvažovat staticky vakuový způsob teplotně programované desorpce, rychlost desorpce bude

$$r_d = -\frac{d\theta}{dt} = k_d\theta^n, \quad (1.3)$$

kde θ je podíl obsazeného povrchu, t je čas a n je kinetický řád desorpce. Ze vztahů (1.2) a (1.3) je patrné, že rychlostní konstanta desorpce, a tím pádem i rychlost desorpce, se bude se vzrůstající teplotou zvyšovat.

V případě průtokového způsobu teplotně programované desorpce bude situace složitější, protože je potřeba uvažovat opětovnou adsorpci již desorbovaných molekul. Vztah pro rychlost v tomto případě bude

$$r_d = -\frac{d\theta}{dt} = k_d\theta^n - k_a c_g (1 - \theta)^m, \quad (1.4)$$

kde k_a je rychlostní konstanta adsorpce, m je kinetický řád adsorpce a c_g je koncentrace adsorptivu v nosném plynu [5], [7].

1.3 ADSORPČNÍ IZOTERMY

Adsorpce je charakterizována vzájemnou závislostí množství adsorbovaného plynu, teploty a rovnovážného tlaku adsorbujícího se plynu. Nejčastěji se měří rovnovážný tlak plynu za konstantní teploty. Z naměřených dat se následně vytvoří adsorpční izotermy [4]. V této části kapitoly jsou tak uvedeny základní teorie popisující adsorpci, a jejich matematické rovnice, které mohou popsat naměřená adsorpční data.

1.3.1 FREUNDLICOVA ADSORPČNÍ IZOTERMA

Jedná se o nejstarší analytické vyjádření závislosti adsorbovaného množství na rovnovážném tlaku. Používá se však dodnes. Průběh závislosti adsorbovaného množství na tlaku naměřený experimentem často připomíná parabolu. Proto byla formulována rovnice

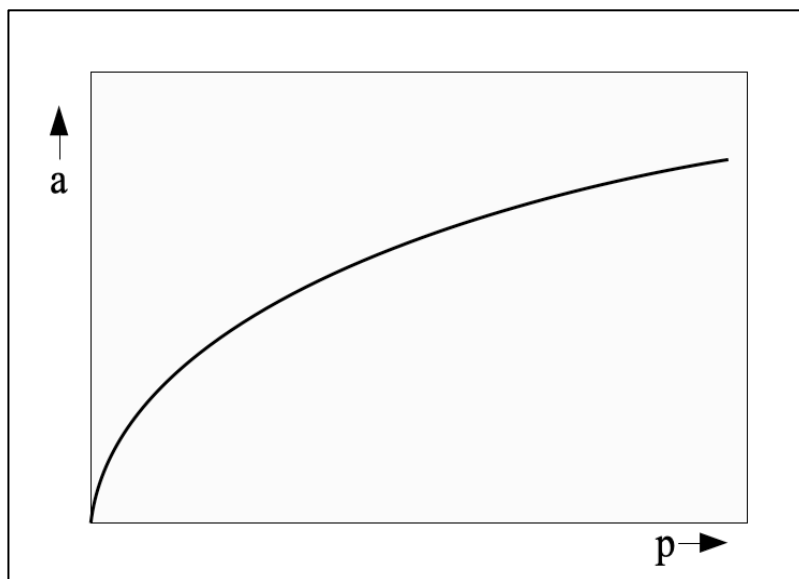
$$a = k_{fr} p^{\frac{1}{n_{fr}}}, \quad (1.5)$$

kde a je adsorbované množství, p je rovnovážný tlak, k_{fr} a n_{fr} jsou konstanty. Hodnota konstanty k_{fr} klesá s rostoucí teplotou, konstanta n_{fr} je vždy větší než jedna, a s rostoucí

teplotou se jedné blíží. Pro zpracovávání experimentálních dat se používá výhodnější lineární tvar rovnice

$$\ln a = \ln k_{fr} + \frac{1}{n_{fr}} \ln p . \quad (1.6)$$

Tvar Freundlichovy adsorpční izotermy je zobrazen v grafu na *obrázku 1.5* [4], [7].



Obrázek 1.5 Freundlichova adsorpční izoterma

1.3.2 LANGMUIROVA ADSORPČNÍ IZOTERMA

Tato izoterma představuje základní rovnici povrchové chemie. Často se využívá k popisu chemisorpce. Americký fyzik a chemik Irving Langmuir zavedl následující předpoklady:

1. Všechna adsorpční centra jsou si energeticky rovnocenná, tzn. všechna mají stejnou pravděpodobnost obsazení při adsorpci.
2. Na každé adsorpční centrum může být navázána pouze jedna molekula. Vzniká tedy pouze monovrstva.
3. Adsorbované molekuly se vzájemně neovlivňují.

Za rovnovážný stav potom považoval to, když je rychlost, s jakou se molekuly adsorbují, shodná s rychlostí desorpce. Rychlost adsorpce je dána rovnicí

$$r_a = k_a(1 - \theta)p, \quad (1.7)$$

kde r_a je rychlost adsorpce, k_a je rychlostní konstanta adsorpce, $(1 - \theta)$ je podíl volného povrchu a p je tlak adsorbujícího se plynu. Z podmínky rovnovážného stavu a rovnic (1.3) a (1.7) dostáváme

$$k_a(1 - \theta)p = k_d\theta, \quad (1.8)$$

z čehož po úpravě dostáváme tvar

$$\theta = \frac{\left(\frac{k_a}{k_d}\right)p}{1 + \left(\frac{k_a}{k_d}\right)p} = \frac{bp}{1 + bp}. \quad (1.9)$$

Poměr adsorpční a desorpční konstanty byl nahrazen konstantou b , přičemž $b = b(T)$. Podíl obsazeného povrchu θ lze také vyjádřit jako poměr

$$\theta = \frac{a}{a_m}, \quad (1.10)$$

kde a je množství adsorbovaného plynu za tlaku p , a a_m je množství plynu, které je potřeba k úplnému pokrytí povrchu monovrstvou. Spojením rovnic (1.9) a (1.10) dostaneme nejčastěji užívaný tvar Langmuirovy izotermy:

$$a = a_m \frac{bp}{1 + bp}. \quad (1.11)$$

Při nízkých tlacích, kdy $bp \ll 1$ se závislost stává lineární:

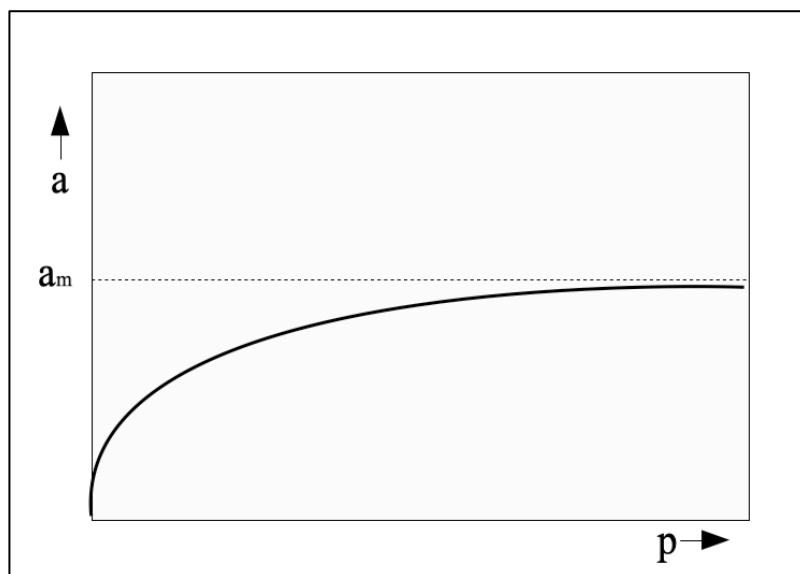
$$a = a_m bp. \quad (1.12)$$

Při vysokých tlacích se naopak adsorbované množství a limitně blíží hodnotě a_m .

Pro zpracovávání dat naměřených experimentem se používá linearizovaný tvar rovnice (1.11)

$$\frac{p}{a} = \frac{1}{ba_m} + \frac{p}{a_m}. \quad (1.13)$$

Tvar Langmuirovy adsorpční izotermy je zobrazen v grafu na obrázku 1.6 [4], [7].



Obrázek 1.6 Langmuirova adsorpční izoterma

1.3.3 IZOTERMA B.E.T.

Tvůrci izotermy jsou Brauner, Emmet a Teller. Ti aplikovali Langmuirovy myšlenky na vícevrstvou adsorpci. Uvažovali, že se na první adsorbované vrstvě vytvářejí další vrstvy vlivem mezimolekulárních sil mezi molekulami adsorbovaného plynu a adsorptivu. Druhá a další vrstvy nejsou již vázány adsorpčními silami, protože předpoklad autorů byl, že síly mají krátký dosah. Jsou tak místo toho vázány silami kondenzačními. Toto je možné jen pod kritickou teplotou adsorbátu. Izoterma B.E.T. má tvar

$$a = a_m \frac{C p_{rel}}{(1 - p_{rel})[1 + (C - 1)p_{rel}]}, \quad (1.14)$$

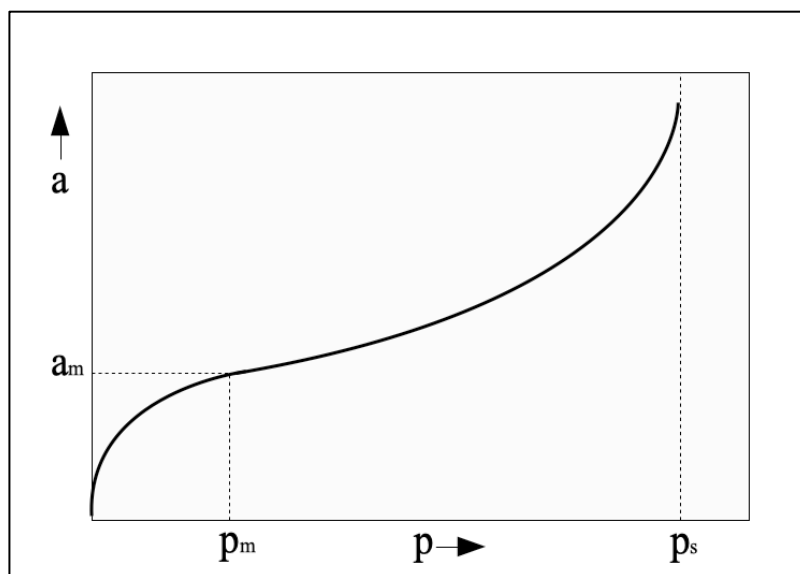
kde $p_{rel} = p/p_s$ je relativní tlak, tzn. poměr rovnovážného tlaku ku tlaku nasycené páry adsorbátu při dané teplotě, a_m množství adsorbovaného plynu na jednotkové hmotnosti adsorbentu v případě pokrytí povrchu monovrstvou. To však v tomto případě není hodnota maximálního adsorbovatelného množství. Konstanta C souvisí s adsorbčním a kondenzačním teplem adsorbátu v první vrstvě.

Při adsorpci dle izotermy B.E.T. se tedy nejprve zaplňuje první vrstva, a na ní vznikají následně další vrstvy [4].

V praxi se při vyhodnocování experimentálních dat velmi často využívá rovnice N-B.E.T., kde je počet vrstev tvořících se na povrchu omezen na konečné číslo N . Rovnice tak dostává tvar

$$a = a_m \frac{C p_{rel}}{(1 - p_{rel})} \frac{1 - (N + 1)p_{rel}^N + N p_{rel}^{N+1}}{1 + (C - 1)p_{rel} - C p_{rel}^{N+1}}, \quad (1.15)$$

příčemž parametr N se volí tak, aby rovnice měla co největší shodu s experimentálními daty [7]. Izoterma B.E.T. je zobrazena na *obrázku 1.7*. Od počátku až do hodnoty tlaku p_m se zaplňuje jedna vrstva. Při této hodnotě je téměř zaplněna první vrstva. Následně se začínají zaplňovat další vrstvy [4].



Obrázek 1.7 B.E.T. izoterma

1.4 ZPŮSOBY REGENERACE MATERIÁLU

Pro opakované využití adsorbentu je žádoucí najít způsoby, jak adsorbent regenerovat, tzn. odstranit z něj adsorbovaný plyn. Většina typických operací zachytávání plynu na adsorbentu tak probíhá v cyklech, kdy je plyn nejprve zachytáván, a následně uvolňován. K uvolňování adsorbovaného plynu bývá využíván tlak, teplota nebo i vlhkost.

Systém využívající tlak se nazývá PSA (Pressure Swing Adsorption). Při tomto způsobu jsou cykly adsorpce a desorpce působeny změnami v tlaku přiváděného plynu [8]. Adsorpce se provádí při zvýšeném tlaku oproti atmosférickému tlaku [9]. Desorpce pak probíhá při snižování tlaku na hodnotu atmosférického tlaku. Variantou PSA je VSA (Vacuum Swing Adsorption), která probíhá ve vakuu a používá se v případě, že adsorpce proběhla za atmosférického či nižšího tlaku. PSA je však např. pro využití v obydlích nepraktická, protože vyžaduje zařízení pro změnu tlaku v plynu.

Další způsob, který je k regeneraci využíván, je zahřívání adsorbentu. Při zvýšení teploty v místě adsorpce se adsorbovaný plyn začne uvolňovat. Tento způsob regenerace se nazývá TSA (Temperatur Swing Adsorption). Při tomto způsobu je do adsorbentu přiváděn horký plyn nebo pára, tím se zvýší teplota v systému a adsorbent se regeneruje. Následně je přiveden studený plyn, který adsorbent ochladí zpět na původní teplotu [9]. Nicméně i TSA vyžaduje zařízení pro ohřev plynu. Cykly ohřevu a chlazení jsou navíc v tomto případě relativně dlouhé. Pro jejich zkrácení se využívá opět vakuum.

Další možností, jak vyvolat desorpci pomocí teploty je ESA (Electric Swing Adsorption). V tomto případě je zahřívání adsorbentu realizováno pomocí elektrod napájených elektrickým proudem. Teplo vydané elektrodami lze stanovit z Jouleova zákona

$$Q = U \cdot I \cdot t, \quad (1.16)$$

kde U je elektrické napětí, I elektrický proud a t je časový interval, na kterém zjišťujeme vydané teplo Q .

2 AKTIVNÍ UHLÍ

2.1 VLASTNOSTI ADSORBENTU

Jedním ze základních požadavků na adsorbent pro fyzikální adsorpci je pórovitá struktura materiálu. Póry také musejí mít vhodnou velikost. Kvůli technickému užití by měl mít materiál zároveň vysokou odolnost proti mechanickému namáhání, chemickým vlivům a teplotním změnám. Dalším požadavkem na kvalitní adsorbent je snadná regenerace materiálu a desorpce vázané látky [10]. Těmto parametrům odpovídá např. aktivní uhlí, silikagel a zeolity. Každý z těchto adsorbentů se užívá pro jiný účel. Aktivní uhlí se hojně využívá pro čištění plynů, vody a potravin. V praxi užívané aktivní uhlí může mít různou podobu. Na *obrázku 2.1* je aktivní uhlí v granulovité podobě a na *obrázku 2.2* v práškové podobě. Silikagel se využívá např. k oddělování vody a lehkých uhlovodíků ze zemního plynu. Zeolit se využívá např. k čištění plynů a selektivnímu dělení směsí uhlovodíků [10].



Obrázek 2.1 Aktivní uhlí v granulovité podobě [11].



Obrázek 2.2 Aktivní uhlí v práškovité podobě [12].

2.2 VÝROBA AKTIVNÍHO UHLÍ

Pro výrobu aktivního uhlí se používají materiály rostlinného původu, jedná se např. o dřevo, uhlí, rašelinu skořápky a pecky. Tyto materiály jsou nejprve karbonizovány. Karbonizace probíhá pyrolýzou za nepřístupu vzduchu. Nejprve probíhá vysoušení materiálu za teplot okolo 170 °C. Následně se zvýší teplota do oblasti 270 až 280 °C, zde začíná exotermní rozklad. V poslední fázi je produkt vyžihán za teplot 400 až 600 °C.

V této fázi jsou z materiálu odstraňovány neuhlíkové prvky, především vodík a kyslík. Atomy uhlíku se seskupují do uspořádaných krystalografických útvarů. Tyto útvary jsou ale vzájemně neuspořádané, takže mezi nimi vznikají štěrbin, které se zaplňují nebo ucpávají uhlíkem v amorfní podobě a dehtovými zplodinami pyrolýzy.

Takto vzniklý materiál je tak z hlediska adsorpce téměř neaktivní. Materiál je potřeba ještě aktivovat. Aktivace probíhá při reakci karbonizovaného materiálu s aktivační látkou (vodní pára, kysličník uhličitý apod.), a to při obvyklých teplotách 700 až 1100 °C. Nejprve vyhořívá neuspořádaný uhlík, tím se uvolňují štěrbin. Následně vyhořívají krystalografické útvary, čímž vznikají další póry. Tento proces bývá v literatuře nazýván fyzikální aktivace.

Celý proces lze zjednodušit pouze do jednoho kroku v případě, že se do procesu karbonizace přidají látky, které omezují tvorbu dehtů. Tento proces bývá nazýván chemická aktivace.

Po aktivaci má aktivní uhlí velký specifický povrch, a to až 2000 m^2/g [13].

2.3 VLASTNOSTI AKTIVNÍHO UHLÍ

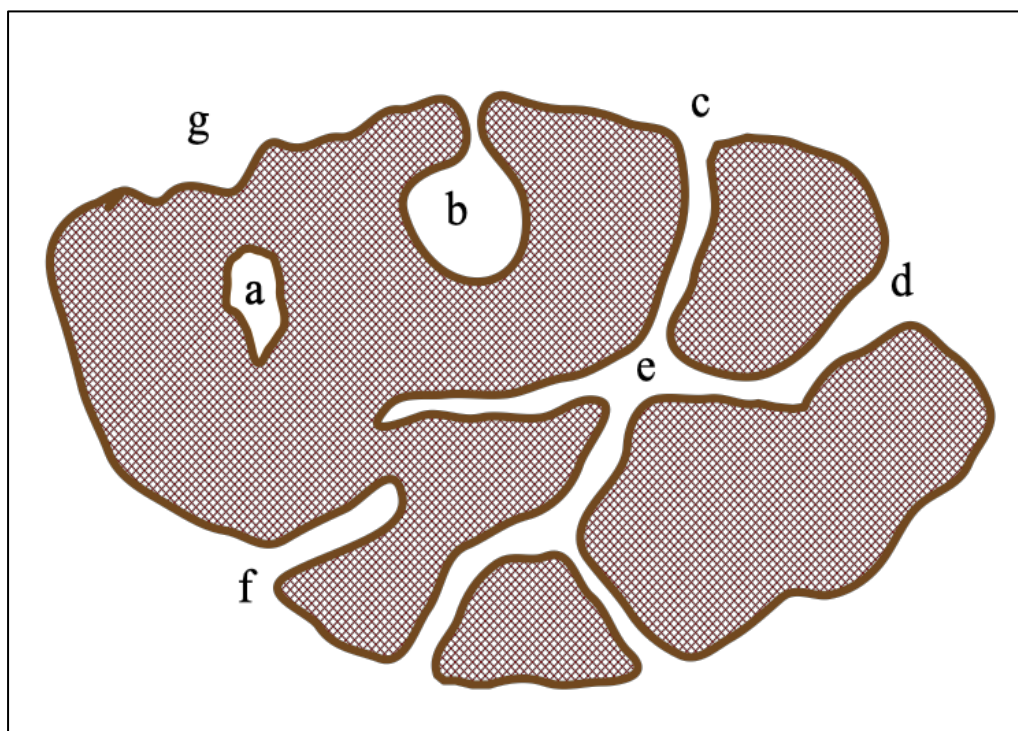
2.3.1 POROZITA

Díky aktivačnímu procesu vznikají v aktivním uhlí póry, které jsou naprosto zásadní pro adsorpční proces. Pórů se při procesu aktivace vytvoří velké množství, díky čemuž se výrazně zvýší i vnitřní povrch aktivního uhlí. Plocha vnějšího povrchu oproti této vnitřní ploše téměř nemá pro adsorpci význam.

Na *obrázku 2.3* jsou vyznačeny typy pórů. Póry můžeme dělit dle několika kritérií. Prvním z nich je přístupnost vnější tekutině. Uzavřené póry vyznačené na obrázku jako (a) jsou izolované od ostatních pórů. Tyto póry ovlivňují hustotu, mechanickou pevnost a tepelnou vodivost adsorbentu, na samotnou adsorpci ale vliv nemají. Otevřené póry jsou naopak spojené s povrchem. Na obrázku se jedná o póry (b), (c), (d), (e) a (f).

Dalším kritériem je průchodnost pórů. Póry, které ústí na více částech vnějšího povrchu se nazývají průchozí. Na obrázku se jedná o póry (e). Naopak póry, které na povrchu ústí jenom jednou se nazývají slepé. Na obrázku jde o póry (b) a (f).

Kritériem dělbý pórů může být také jejich tvar. Póry mohou být cylindrické, na obrázku znázorněné jako (c) a (f), baňkovité, znázorněné jako (b), a trychtýřovité, znázorněné jako (d). Místo (g) znázorňuje nerovnosti povrchu. Nerovnost bývá za pór považována až v situaci, kdy je nerovnost hlubší než širší [13].



Obrázek 2.3 Řez porézním materiálem

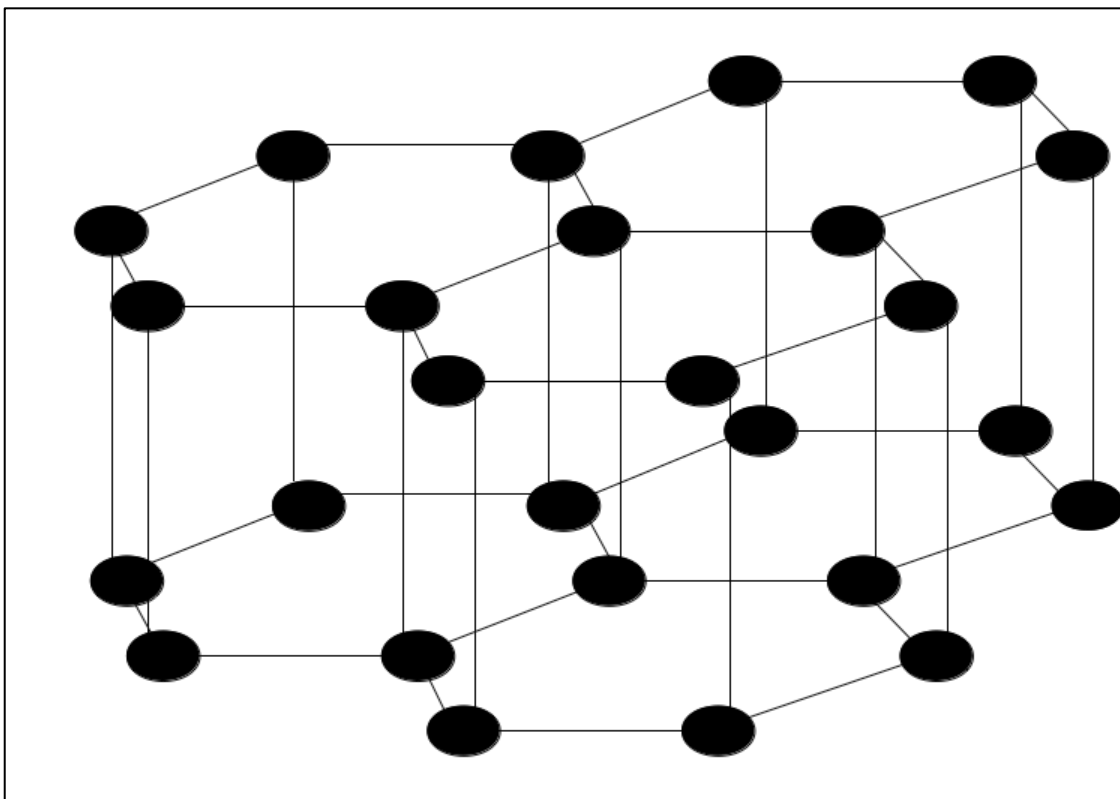
Kritériem dělení pórů je také jejich velikost. Póry lze dělit na mikropóry, mezopóry a makropóry. Mikropóry mají šířku menší než 2 nm , mezopóry mají šířku 2 až 50 nm a makropóry mají šířku větší než 50 nm [13], [14].

Pro adsorpci mají největší význam mikropóry, které nejvíce rozhodují o adsorbční kapacitě aktivního uhlí díky své velké specifické ploše. Vše je ale podmíněno tím, že molekuly adsorbátu nemají větší průměr, než je průměr mikropórů. Mezopóry a makropóry slouží především jako transportní póry adsorbátu k mikropórům v hlubších strukturách materiálu [14].

Většina aktivních uhlí obsahuje všechny tři typy pórů, jsou tzv. tridisperzní. Lze však vyrobit aktivní uhlí obsahující pouze konkrétní typ velikosti pórů. Takovýmto způsobem lze například získat adsorbát, který je schopný oddělovat části směsi plynu dle velikosti molekul.

2.3.2 STRUKTURA

Struktura aktivního uhlí je podobná grafitu. U elementárních zrn tak lze pozorovat roviny tvořené šestiúhelníky grafitu. Tato struktura má šířku několika atomů a tvoří stěny pórů [13].



Obrázek 2.4 Struktura grafitu – dvě roviny

2.3.3 CHEMICKÉ VLASTNOSTI

Adsorbční vlastnosti aktivního uhlí neovlivňuje pouze pórovitost a plocha specifického povrchu, ale také jeho chemické vlastnosti. Ty jsou ovlivňovány neuhlíkatými příměsemi. Vlastnosti pak ovlivňuje povaha těchto příměsí, způsob jejich vazby a množství. Tyto příměsi mohou být dvojího druhu. Jedním typem jsou příměsi vázané, které jsou součástí chemické struktury látky. Ty mohly ve struktuře zůstat po nedokonalé karbonizaci (zejména kyslík a vodík), případně aktivaci (chlór po aktivaci plynným chlórem). Přítomnost kyslíku a vodíku v aktivním uhlí má na sorpci pozitivní vliv. Kyslík má vliv na velikost a uspořádání elementárních krystalových zrn. Množství kyslíku také ovlivňuje samotný průběh karbonizace a karbonizační teplotu. Kyslík má dále vliv na sorpční vlastnosti pro vodní páry a další polární plyny. Také na stárnutí uskladněných adsorbentů [14].

Druhým typem je popel, který může výrazně změnit adsorpční charakter, a to již při malém množství. Obsah popela v aktivním uhlí stoupá se stupněm karbonizace a aktivace. Popel způsobuje vady ve struktuře aktivního uhlí, a v těchto místech pak dochází k chemisorpci kyslíku. Tím se následně zvyšuje schopnost adsorpce polárních par a plynů [14].

Aktivní uhlí lze také modifikovat. Například pokud je aktivní uhlí modifikováno $AlCl_3$, $NaOH$ nebo Na_2S_3 , zmenšuje se adsorpce dusíku. Modifikace sodíkem nebo draslíkem zase může do určité míry zvýšit pórovitost, protože se díky těmto prvkům tvoří nové póry [14].

2.4 DALŠÍ POUŽÍVANÉ ADSORBENTY

2.4.1 ZEOLIT

Jedná se o aluminosilikát (hlinitokřemičitan). K adsorpci se využívají přírodní i uměle vytvořené zeolity, které mají pravidelnou krystalovou mříž s molekulárními póry. Vyrábí se ze sodných aluminosilikátů v autoklávu za vysokých teplot a tlaků. Proces se nazývá hydrotermální syntéza. Poté následuje výměna určitých kationtů (Na^+ , Li^+ , Ca^{++} , K^+). Poté jsou sušeny mikrokrystaly. Ty jsou granulovány a teplotně aktivovány [13]. Vlastnosti zeolitů jsou dány jejich specifickou krystalickou stavbou – ta se skládá z tetraedrů SiO_4 a AlO_4 . Vnitřní struktura je tvořena kanálky a dutinami přesně definovaných rozměrů a tvarů. Zeolity se využívají při adsorpci za vysokých tlaků (2 bary), jejich adsorpční kapacita se však snižuje, pokud je v protékáném plynu přítomna vlhkost. V takovém případě se zeolit musí regenerovat za vysokých teplot. Zeolity jsou nejvhodnějším adsorbentem pro zachytávání oxidu uhličitého ze směsí spalin. Schopnost adsorpce může být zvýšena přítomností kationtů v zeolitu – ta vede

k silným elektrostatickým interakcím, mezi adsorbentem a CO₂. Nevýhodou krom snížení adsorpční kapacity při vlhkosti v plynu je i to, že k regeneraci zeolitů je třeba velké energie [9].

2.4.2 SILIKAGEL

Jedná se o granulovitou pórovitou formu oxidu křemičitého (SiO₂). Vyrábí se synteticky z křemičitanu sodného, následně se dále zpracovává. Silikagely mají specifický povrch až 800 m²/g. Také mívají vysokou porozitu, díky čemuž jsou vhodné pro adsorpci vody, často se tak používají k zachytávání vlhkosti. V uzavřeném systému jsou schopné zredukovat vlhkost až o 40%. Regenerace probíhá ohřátím na 150 °C. Silikagely jsou stabilní do 400 °C [13].

Vývoj v této oblasti je dnes věnován také kombinovaným adsorbentům. U těchto materiálů je jemně namleté aktivní uhlí vnášeno do alkalického roztoku křemičitanu sodného. Vzniká tak adsorbent na bázi silikagelu a aktivního uhlí. Tyto adsorbenty vykazují dobré adsorbční vlastnosti, zejména pak pro organické látky [15].

3 VYUŽITÍ SIMULAČNÍCH SYSTÉMŮ VE ZKOUMÁNÍ ADSORPCE

CFD (Computational fluid dynamics) je odvětví mechaniky tekutin, které využívá počítačové simulování proudění tekutin. Pro dosažení účinného návrhu adsorpčního procesu je zapotřebí vhodného matematického modelu popisujícího dynamiku adsorpce. Počítačové simulační systémy pro svůj vývoj potřebují experimentální ověřování. Jelikož při návrhu systému bývá experimentální ověřování finančně i časově nákladné, jeví se využití simulačních nástrojů, které mají dostatečné ověření experimentem, jako nejvýhodnější. Simulační nástroj je tvořen deskriptivním matematickým modelem (deskriptivní matematické modely slouží k analýze prvků a vztahů v systému a k analýze základních vlastností systému [16], který předvídá chování adsorpčního systému. Tyto matematické modely jsou experimentálně ověřovány, a využívají nezávislých parametrů pro odhad dynamických vlastností adsorpčního systému, bez času a nákladů, které by byly věnovány experimentálnímu ověřování těchto vlastností. Počítačové simulace navíc umožňují zobrazit teplotní profily a zobrazit např. hodnoty teplot v konkrétních bodech systému. Také lze simulovat změny teploty a složení v adsorbentu s ohledem na čas, prostor a s ohledem na vliv na celkový systém.

Matematické modely využívané při simulování dynamiky adsorbčních procesů jsou tvořeny soustavou parciálních diferenciálních rovnic. Ty v sobě obsahují pole průtoku, hmotnost a přenos energie uvnitř pole (bilance hmotnosti, hybnosti, energie). Pole průtoku je obvykle modelováno jako pevné pole (s vhodnými okrajovými podmínkami), ve kterém probíhá adsorpce. Kvůli složitosti řešení systému parciálních diferenciálních rovnic je žádoucí celé řešení zjednodušit a optimalizovat. Složitost matematického modelu pro popis adsorpce závisí na volbě koncentrace, rychlostní rovnice a průtokového modelu.

Matematické modely s pevným polem se používají k dočasné předpovědi výkonu adsorpčního systému při změně dynamických vlastností plynu a průtočného místa, jako jsou změna průtoku, teploty, koncentrace apod. Při návrhu modelu bývá pro průtok skrze adsorpční kolonu volen model, kdy je rychlost v každém bodě průřezu konstantní, přičemž v axiálním směru může být různá [17]. Jednotlivé užívané výpočtové modely se od sebe liší některými vlastnostmi. Některé modely počítají s tím, že účinky vzniku a přenosu tepla v místě adsorpce mohou ovlivňovat rychlost reakce apod. Některé zase uvažují ideální plyn, některé zanedbávají gradient koncentrace (a tlaku a teploty), některé zanedbávají přenos tepla mezi pevnou a plynnou fází a některé zanedbávají pokles tlaku v místě adsorpce.

V modelech adsorpční rovnováhy se velmi často užívají nelineární izotermy, lineární bývají využívány jen zřídka. Příkladem je Langmuirova izoterma. Experimenty však bylo zjištěno, že při vysokých koncentracích plynu vznikají v místě adsorpce tepelné vlny, které se šíří v axiálním i radiálním směru systému, a ten se tak zahřívá. Langmuirova izoterma však předpokládá konstantní teplotu, proto může dobře napodobit systém adsorpce při nízkých koncentracích, avšak se zvyšující se koncentrací je odchylka chování modelu od chování reálného adsorpčního systému větší a větší. Další autoři proto izotermu upravovali tak, aby více vyhovovala těmto podmínkám.

Numerické modely pro adsorpci jsou ve většině případů uvažovány jako jednorozměrné. K řešení numerických modelů se pak velmi často využívají různé softwary a kódy, které umožňují řešení rovnic modelu. Velmi často se jedná o numerická řešení. Někdy se modely řeší metodou konečných prvků. Některé modely jsou řešeny jako soustava algebraických rovnic a některé jako soustava diferenciálních rovnic.

4 EXPERIMENT

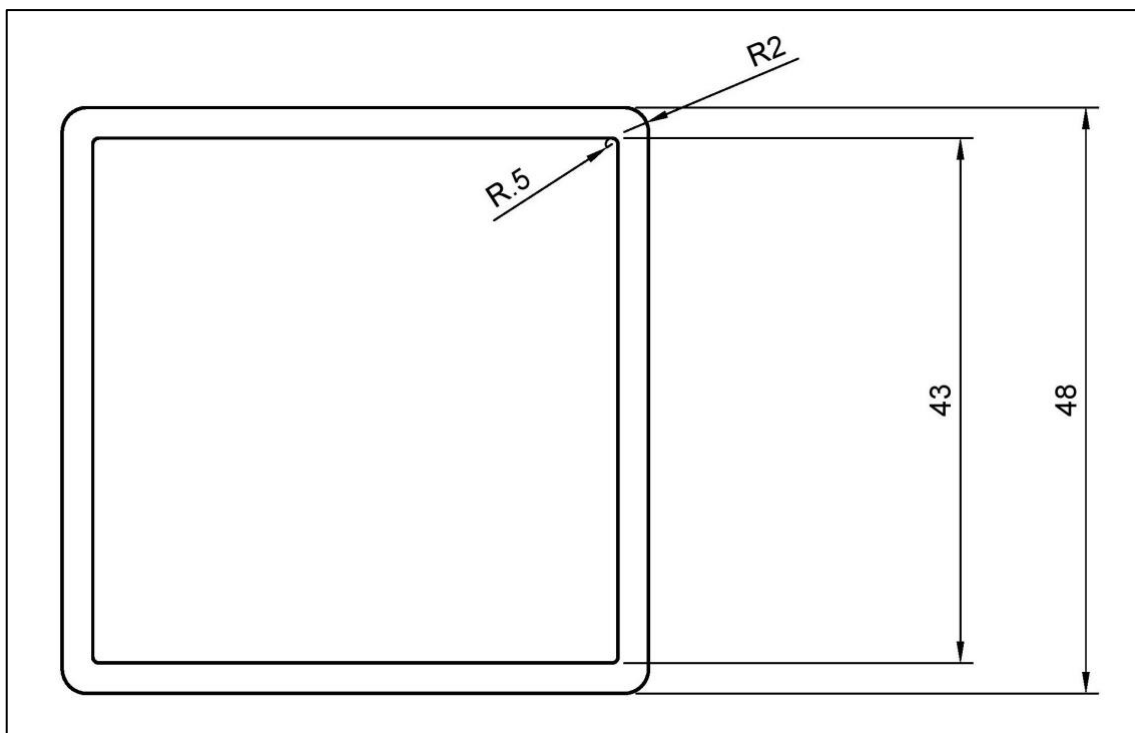
Cílem experimentu bylo prověřit adsorpční chování monolitu aktivního uhlí, pokud je monolit zahříván. Monolit je zobrazen na *obrázku 4.1*, kde je zároveň vidět i propustná strana monolitu. Zachytávaným plynem byl oxid uhličitý. Monolit byl zahříván pomocí elektrod a protékal jím vzduch, který oxid uhličitý obsahoval.



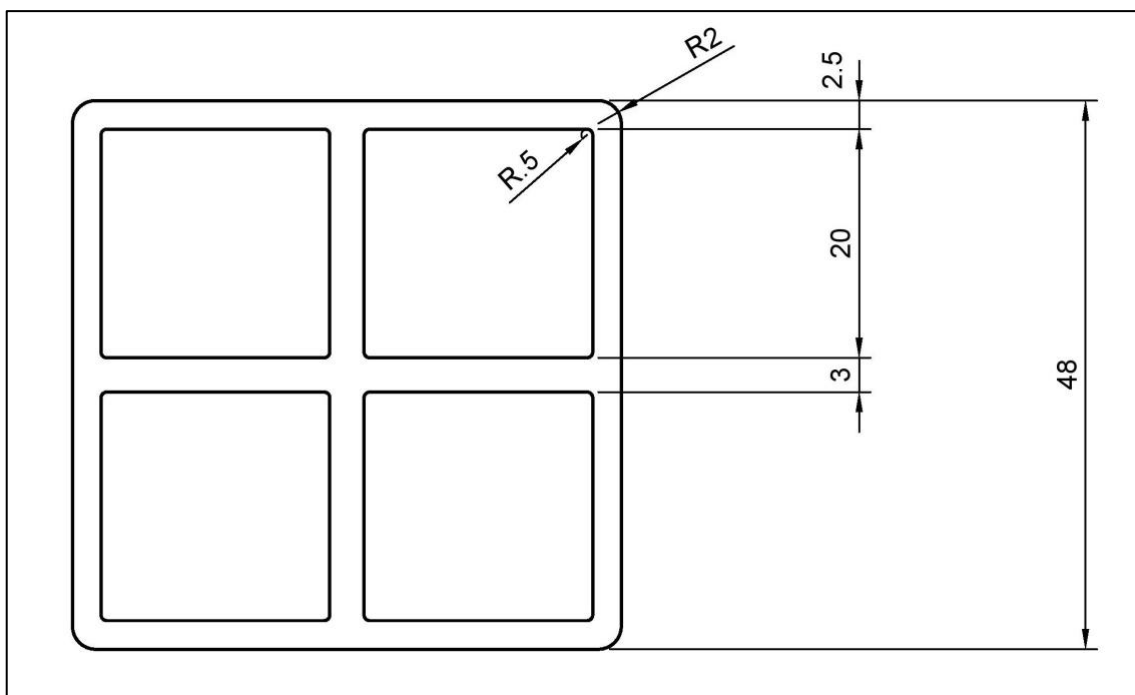
Obrázek 4.1 Zkoumaný monolit aktivního uhlí

4.1 NÁVRH ELEKTROD

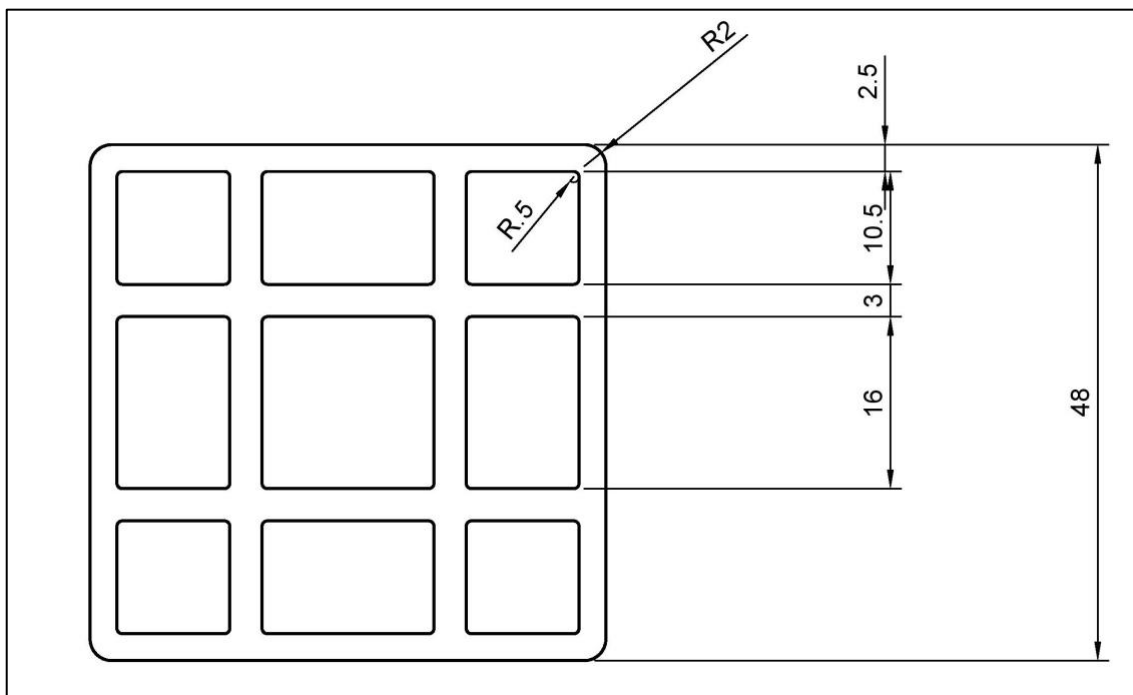
Pro prohřátí monolitu byly navrženy tři typy elektrod. Rozměry elektrod byly dány velikostí monolitu tak, aby licovaly k propustným stranám monolitu. Elektrody byly navrženy z hliníkového plechu o tloušťce 2 mm. Návrhy pro výrobu elektrod jsou zobrazeny na *obrázku 4.2*, *obrázku 4.3* a *obrázku 4.4*. Vyrobené elektrody jsou na *obrázku 4.5*. Elektrody byly vyříznuty laserem.



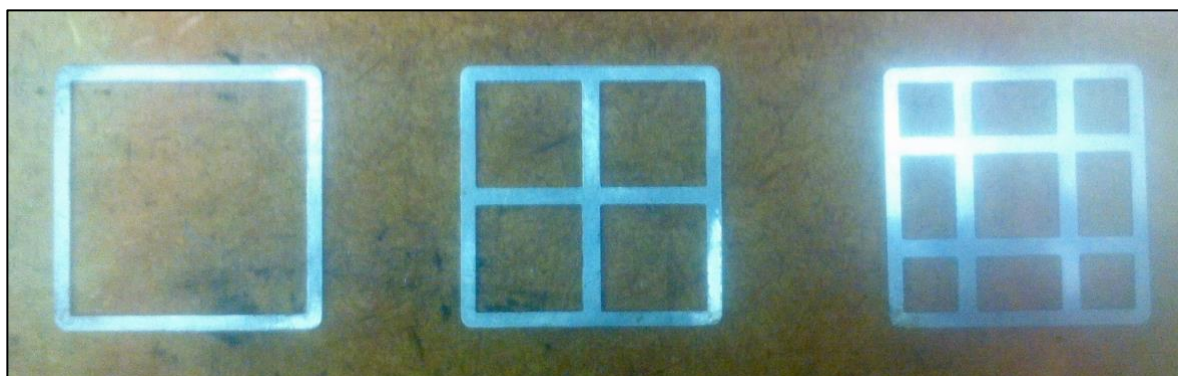
Obrázek 4.2 Návrh elektrody č. 1



Obrázek 4.3 Návrh elektrody č. 2



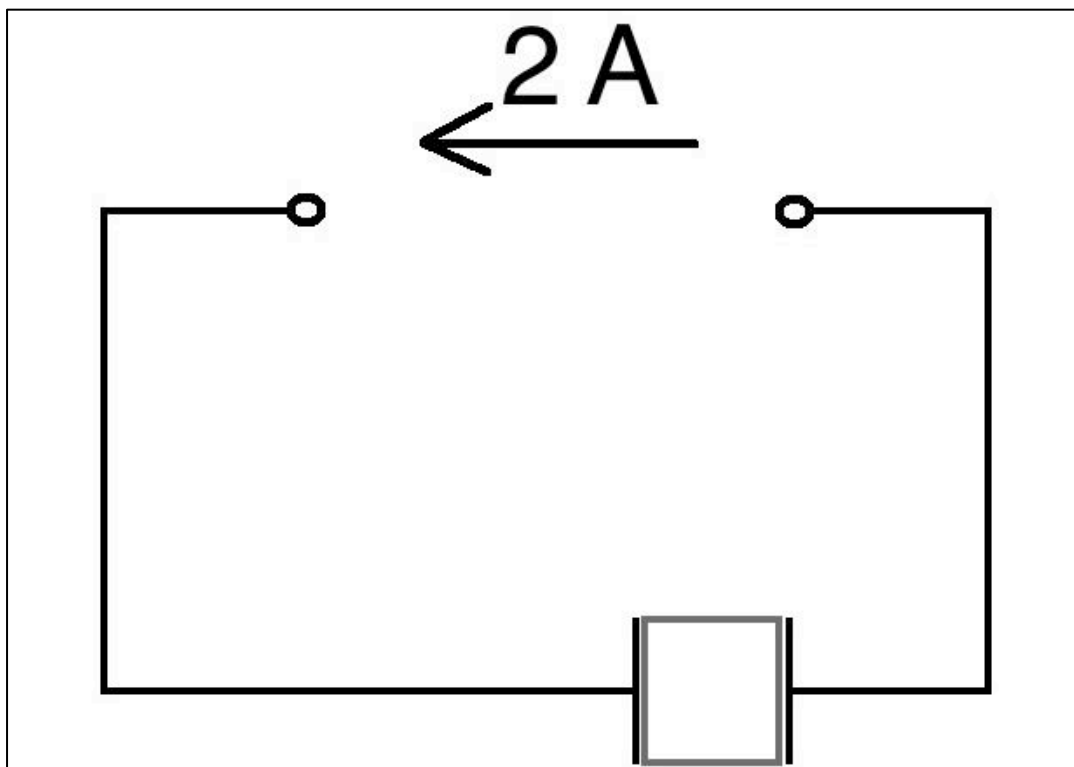
Obrázek 4.4 Návrh elektrody č. 3



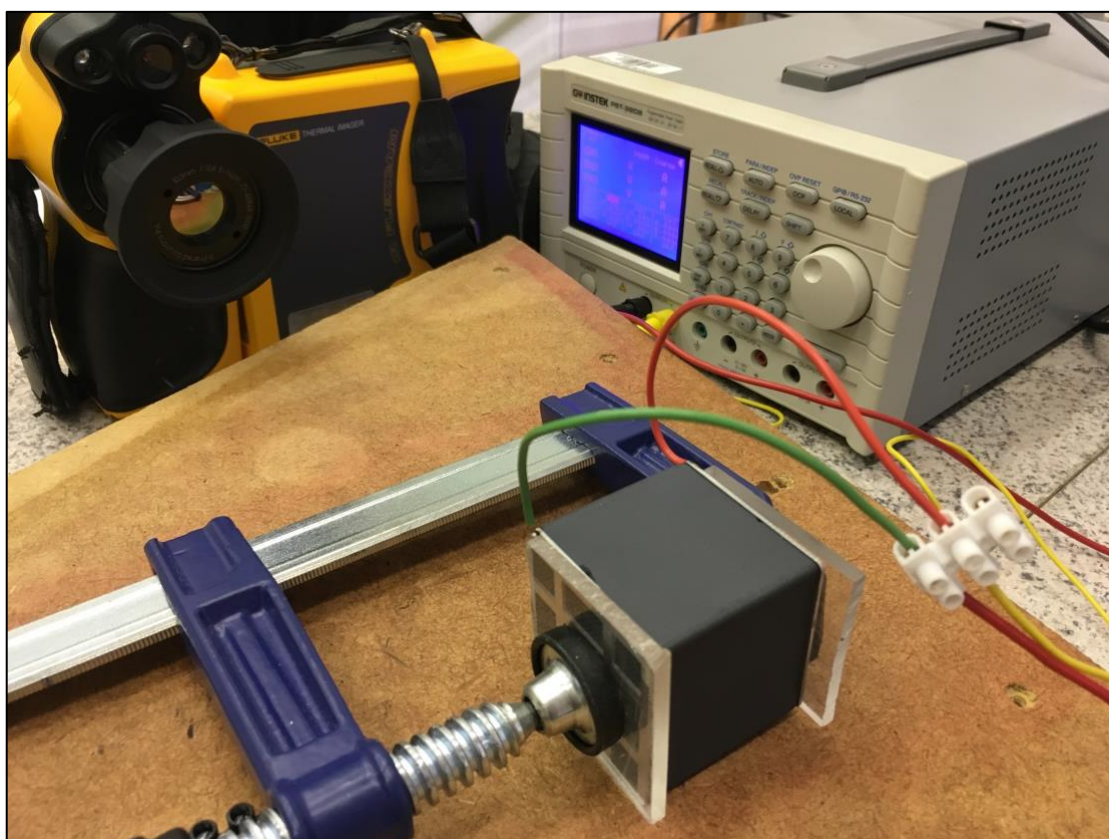
Obrázek 4.5 Vyrobené elektrody

4.1.1 PROHŘÍVÁNÍ MONOLITU

Nejprve se zkoumalo, jak se bude monolit prohřívat. Na monolit byly přiloženy elektrody ze dvou stran, následně byla přes elektrody přiložena ještě destička z plastu, kterou byly odizolovány úniky tepla ze stran s elektrodami. Na elektrody byly následně přidělány svorky, které byly zapojeny do zdroje. Schéma zapojení je zobrazeno na *obrázku 4.6*, kompletní sestava je zobrazena na *obrázku 4.7*.



Obrázek 4.6 Schéma zapojení elektrod při prohřívání monolitu



Obrázek 4.7 Monolit s elektrodami zapojenými do zdroje, kamera IR FLEXCAM Ti55FT

Elektrody byly napájeny stejnosměrným proudem o konstantní velikosti, kde $I = 2 \text{ A}$, $U = 5,23 \text{ V}$. Následně bylo na termokameře pořízeno vždy dvacet snímků. Snímky byly pořizovány vždy po 30 sekundách. Čas zahřívání byl tedy $t = 570 \text{ s}$. Z Jouleova zákona (rovnice 1.16) lze vypočítat, že výsledné teplo, které bylo vydané elektrodami mělo velikost $Q = 5962,2 \text{ J}$.

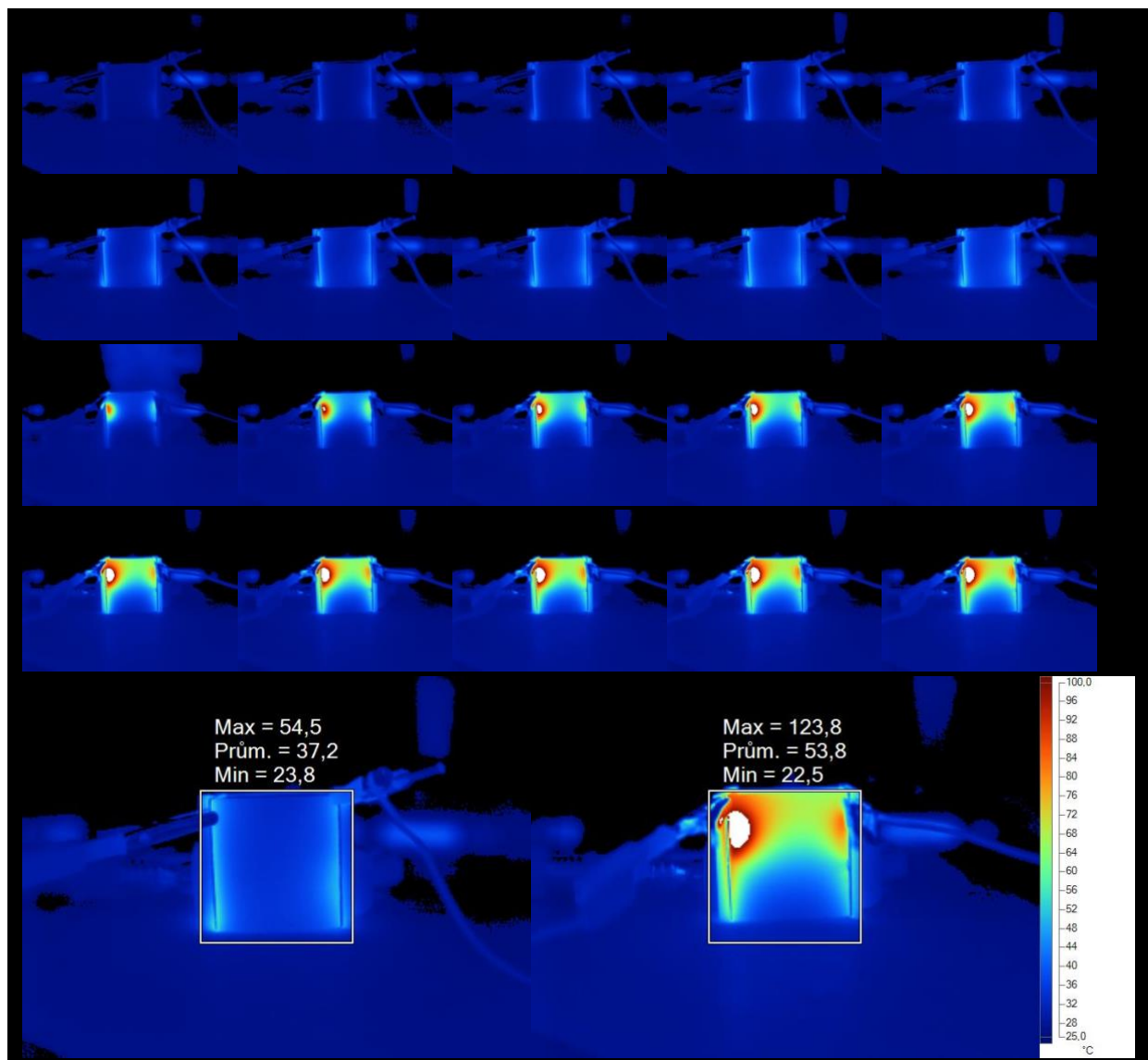
Prohřívání u každé elektrodu bylo snímáno vždy pro dvě strany. V průběhu experimentu bylo zjištěno, že materiál se ze stran, které jsou vůči sobě kolmé, prohřívá jinak. Z jedné strany výrazně více než ze strany druhé. Předpokládalo se, že je to způsobeno vadou materiálu. V průběhu měření byl monolit otočen vůči elektrodě, a bylo tak zjištěno, že méně se prohřívající strany jsou neustále ty stejné (naproti sobě). Proto byly záběry z kamery pořízeny ze dvou směrů. Zahřívání bylo snímáno vždy z jedné strany, následně došlo k vychlazení materiálu, jeho otočení o 90° a následnému dalšímu měření.

Snímky byly pořízeny kamerou IR FLEXCAM Ti55FT (obrázek 4.7), s objektivem o ohniskové vzdálenosti $10,5 \text{ mm}$. Emisivita byla $0,902$. Přesnost měření, která je udávána výrobcem, je $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ nebo 2% z naměřené hodnoty teploty. Jako rozhodující se potom bere větší z těchto dvou hodnot.

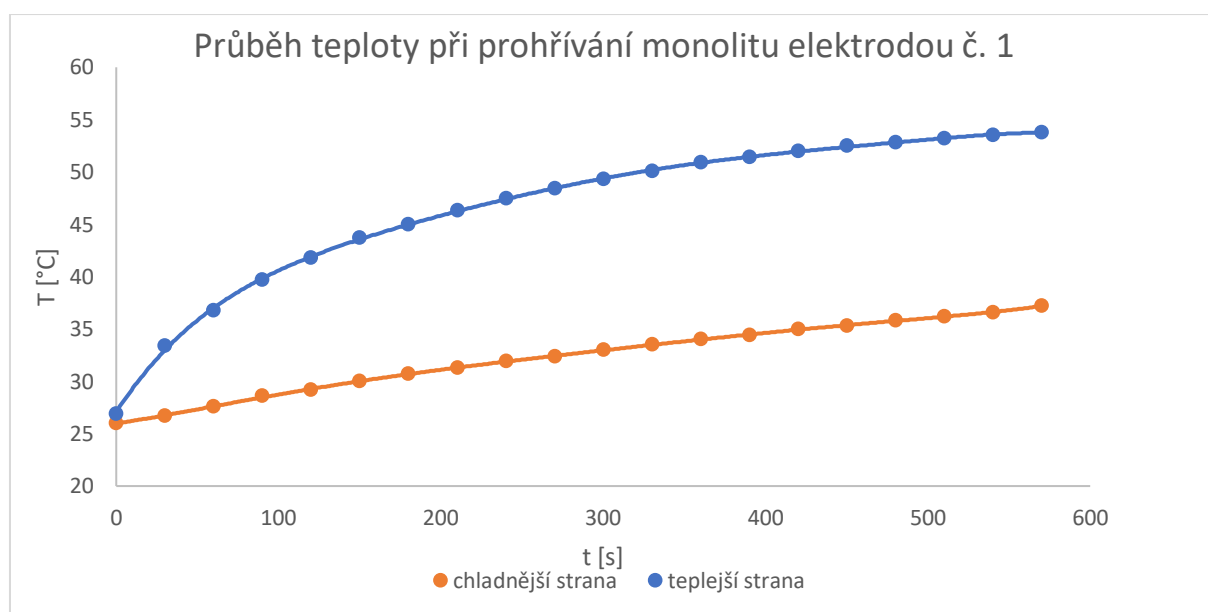
Následně byly snímky vyhodnoceny ve specializovaném programu Fluke SmartView, určeném pro vyhodnocování infračervených snímků.

4.1.2 PROHŘÍVÁNÍ MONOLITU ELEKTRODOU Č. 1

Průběh teplot je znázorněn grafem na obrázku 4.9. Teploty jsou zaznamenány v tabulce PŘÍLOHA 1. Na obrázku 4.8 je vidět průběh prohřívání zachycený 30 s od počátku prohřívání, a následně vždy po 60 s. Závěrečný snímek je vždy zobrazen ještě ve větším měřítku, hodnotami minimální, průměrné, maximální teploty a teplotní škálou. Z obrázku 4.8 je vidět, že po 570 s je maximální teplota monolitu z teplejší strany $123,8 \text{ }^\circ\text{C}$, minimální teplota $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná $53,8 \text{ }^\circ\text{C}$. U chladnější strany je maximální teplota $54,5 \text{ }^\circ\text{C}$, minimální $23,8 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrná $37,2 \text{ }^\circ\text{C}$.



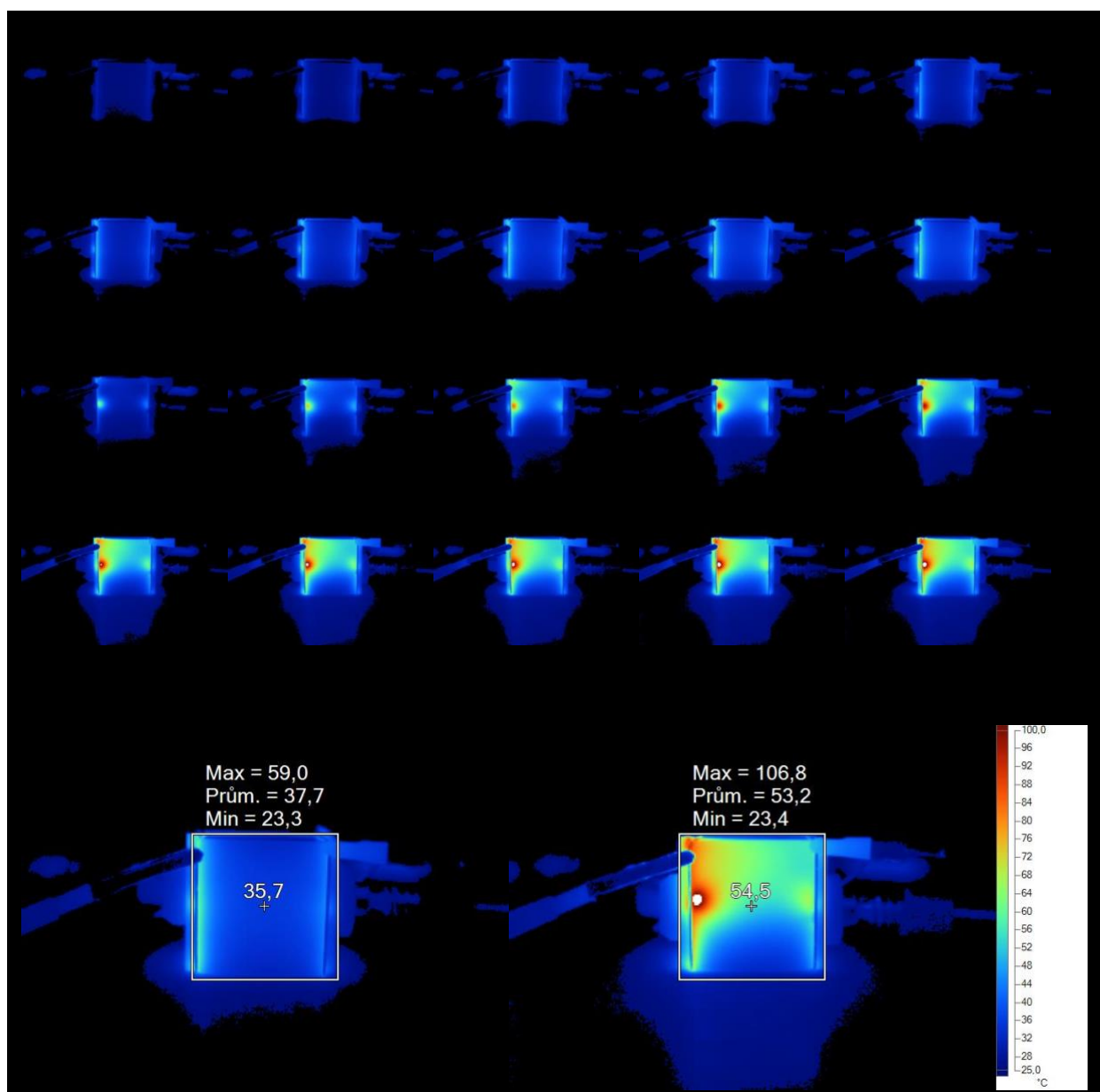
Obrázek 4.8 Průběh teploty při prohřívání monolitu elektrodou č. 1



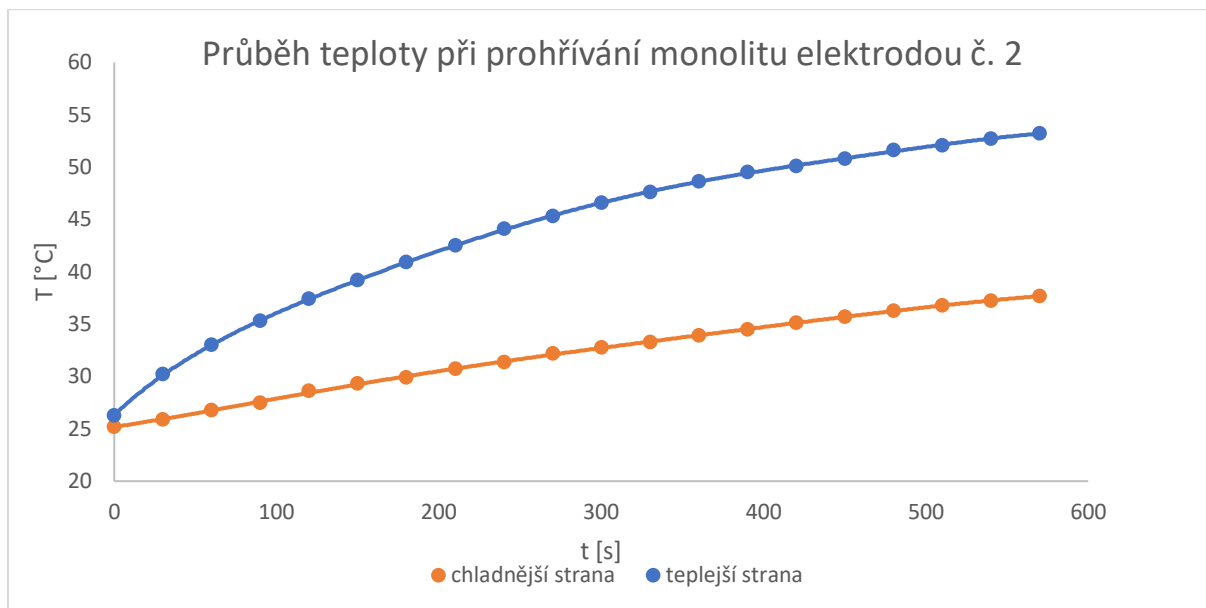
Obrázek 4.9 Graf průběhu průměrné teploty při prohřívání monolitu elektrodou č. 1

4.1.3 PROHŘÍVÁNÍ MONOLITU ELEKTRODOU Č. 2

Průběh teplot je znázorněn grafem na *obrázku 4.11*. Hodnoty jsou zaznamenány v tabulce *PŘÍLOHA 2*. Na *obrázku 4.10* jsou záznamy z termokamery. Z *obrázku 4.10* je patrné, že po 570 s je maximální teplota monolitu z teplejší strany 106,8 °C, minimální teplota je 23,4 °C a průměrná 53,2 °C. U chladnější strany je maximální teplota 59 °C, minimální 23,3 °C a průměrná teplota 37,7 °C. Průběh prohřívání je opět zachycen v čase 30 s od počátku prohřívání, a následně vždy po 60 s.



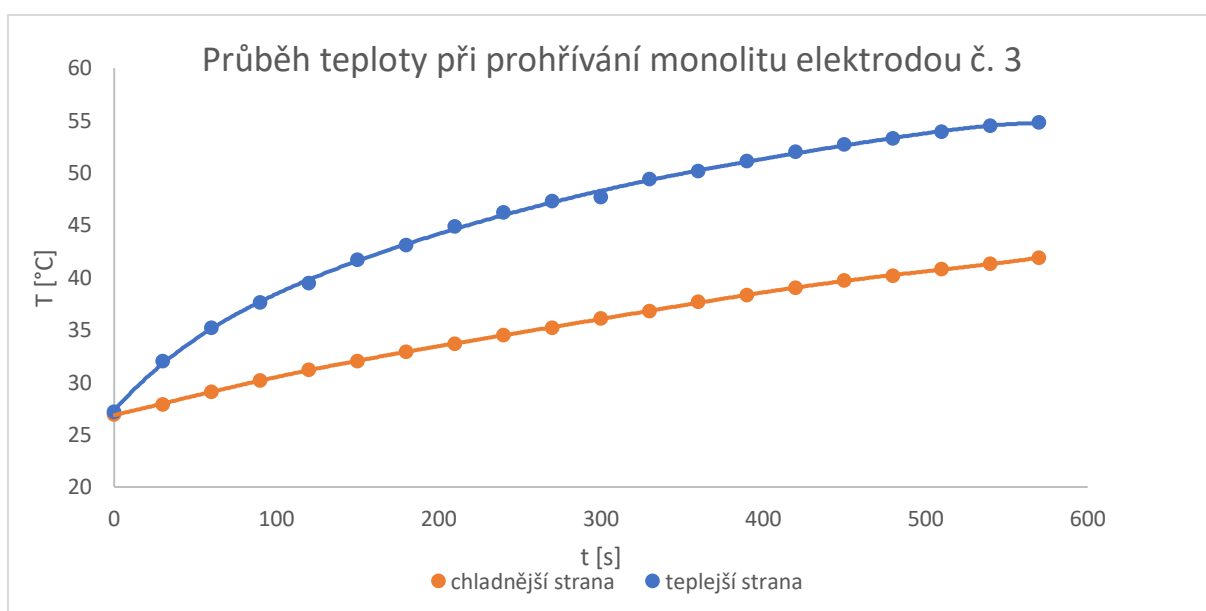
Obrázek 4.10 Průběh teploty při prohřívání monolitu elektrodou č. 2



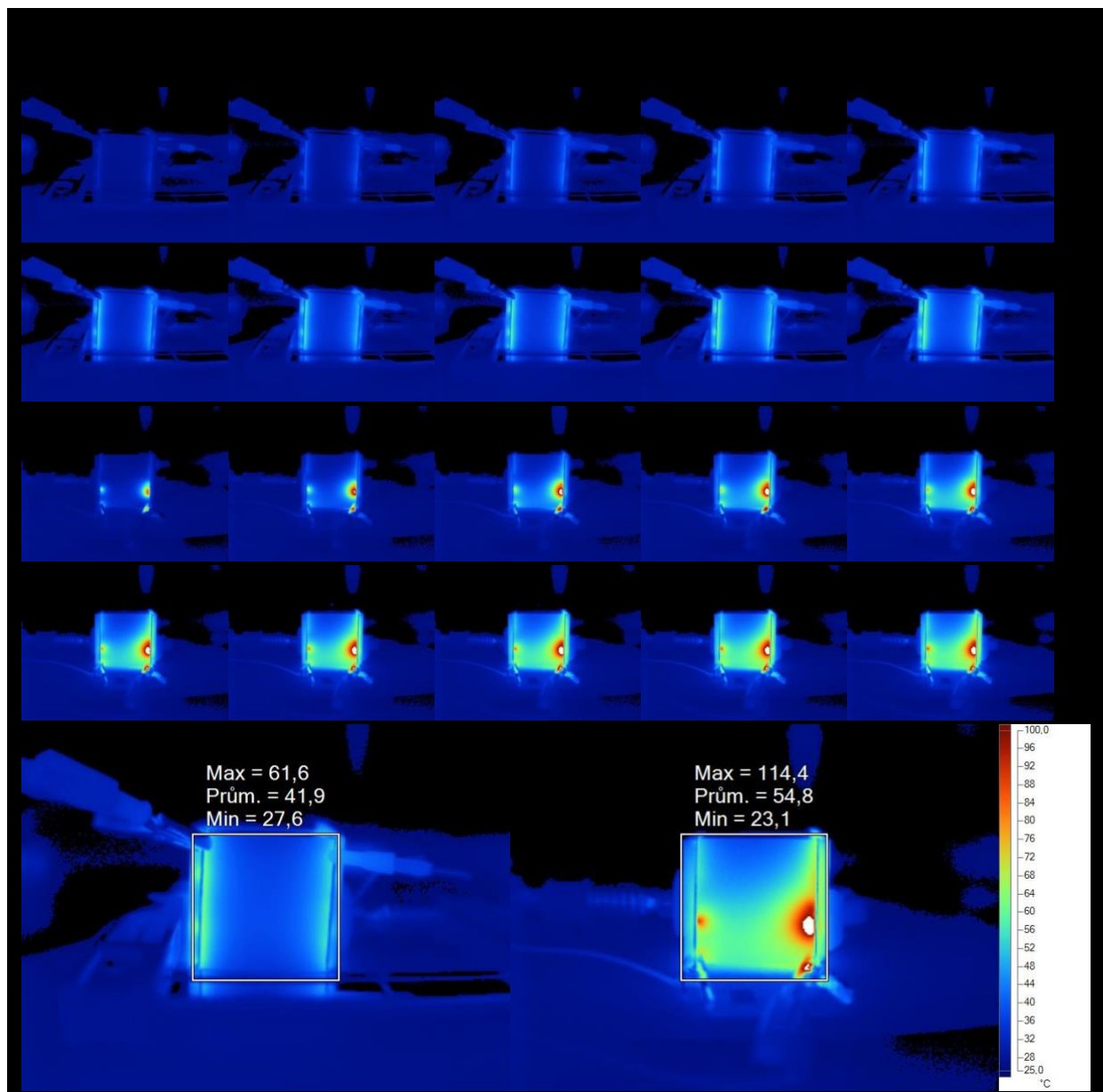
Obrázek 4.11 Graf průběhu průměrné teploty při prohřívání monolitu elektrodou č. 2

4.1.4 PROHŘÍVÁNÍ MONOLITU ELEKTRODOU Č. 3

Průběh teplot je znázorněn grafem na *obrázku 4.12*, a je součástí tabulky *PŘÍLOHA 3*. Z *obrázku 4.13* je opět patrné, že po 570 s je maximální teplota monolitu z teplejší strany 114,4 °C, minimální teplota je 23,1 °C a průměrná 54,8 °C. U chladnější strany je maximální teplota 61,6 °C, minimální 27,6 °C a průměrná teplota 41,9 °C. Průběh prohřívání je zachycen stejným způsobem jako na *obrázku 4.8* a *obrázku 4.10*.



Obrázek 4.12 Graf průběhu průměrné teploty při prohřívání monolitu elektrodou č. 3



Obrázek 4.13 Průběh teploty při prohřívání monolitu elektrodou č. 3

4.1.5 VÝBĚR TYPU ELEKTRODY PRO EXPERIMENT

Z naměřených výsledků vychází, že při prohřívání monolitu dosahovaly na lépe se prohřívající straně nejvyšších hodnot průměrné teploty elektrody č. 3, kde průměrná teplota měla hodnotu 54,8 °C. U elektrody č. 2 měla průměrná teplota hodnotu 53,2 °C. U elektrody č. 1 byla průměrná teplota 53,8 °C.

Na hůře se prohřívající straně dosahovala průměrná teplota elektrody č. 3 hodnoty 41,9 °C, u elektrody č. 2 to byla hodnota 37,7 °C. Průměrná teplota elektrod č. 1 dosahovala hodnoty 37,2 °C.

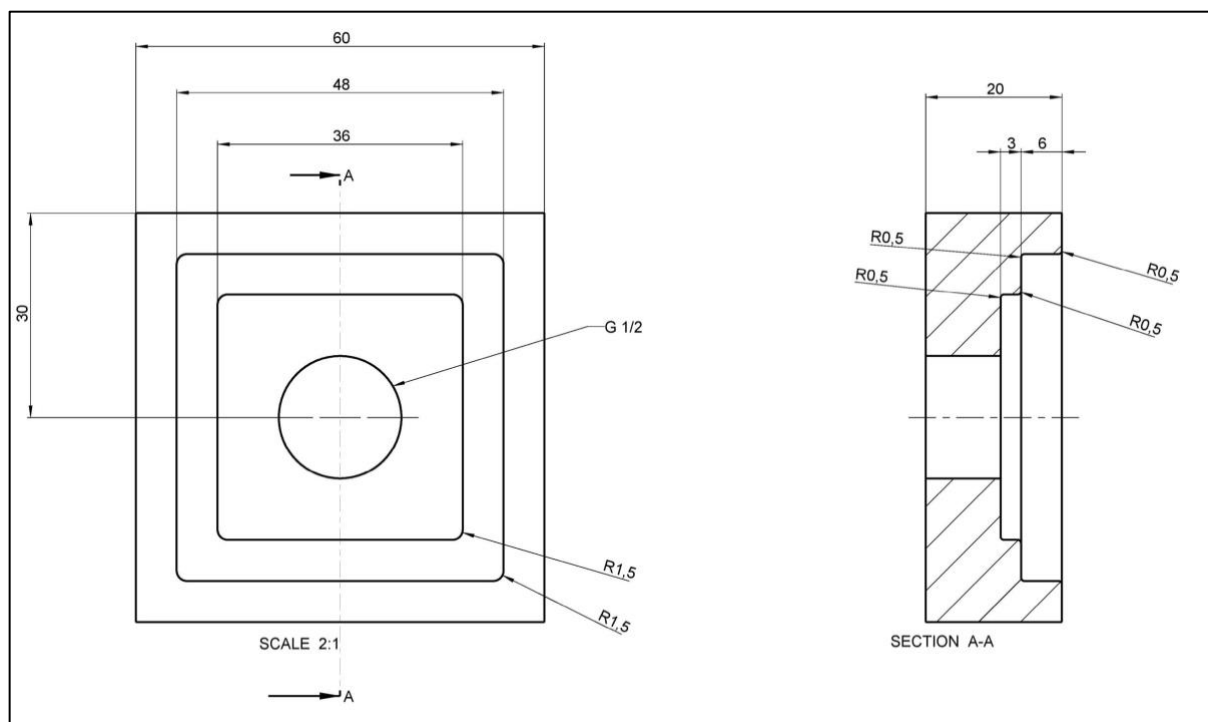
V *tabulce 4.1* jsou uvedeny celkové průměrné teploty monolitu při prohřívání za pomoci jednotlivých typů elektrod. Z tabulky je patrné, že hodnoty celkových průměrných teplot pro všechny jednotlivé typy elektrod jsou v interval 2,9 °C.

Tabulka 4.1 Celkové průměrné teploty			
Elektroda	teplejší strana	chladnější strana	průměr
	[°C]	[°C]	[°C]
1	53,8	37,2	45,5
2	53,2	37,7	45,45
3	54,8	41,9	48,35

Přesnost měření mohla být ovlivněna tím, jak kvalitně na sebe během experimentu dosedaly plochy elektrod a monolitu, nicméně všechny typy elektrod prohřívají monolit velmi podobně. Rozhodujícím faktorem pro volbu elektrod byla nakonec jejich konstrukce. Pro experiment byla zvolena elektroda č. 2. Do středu elektrody totiž byl během experimentu přiváděn měřený plyn, a elektroda č. 2 má jako jediná ve středu plechy ve tvaru kříže, které měly za úkol pomoci lépe rozptýlit plyn po celém průřezu monolitu. V neprospěch elektrody č. 3 rozhodovalo také to, že zabírá více plochy. To by mohlo bránit průduchu vzduchu do štěrbin.

4.2 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

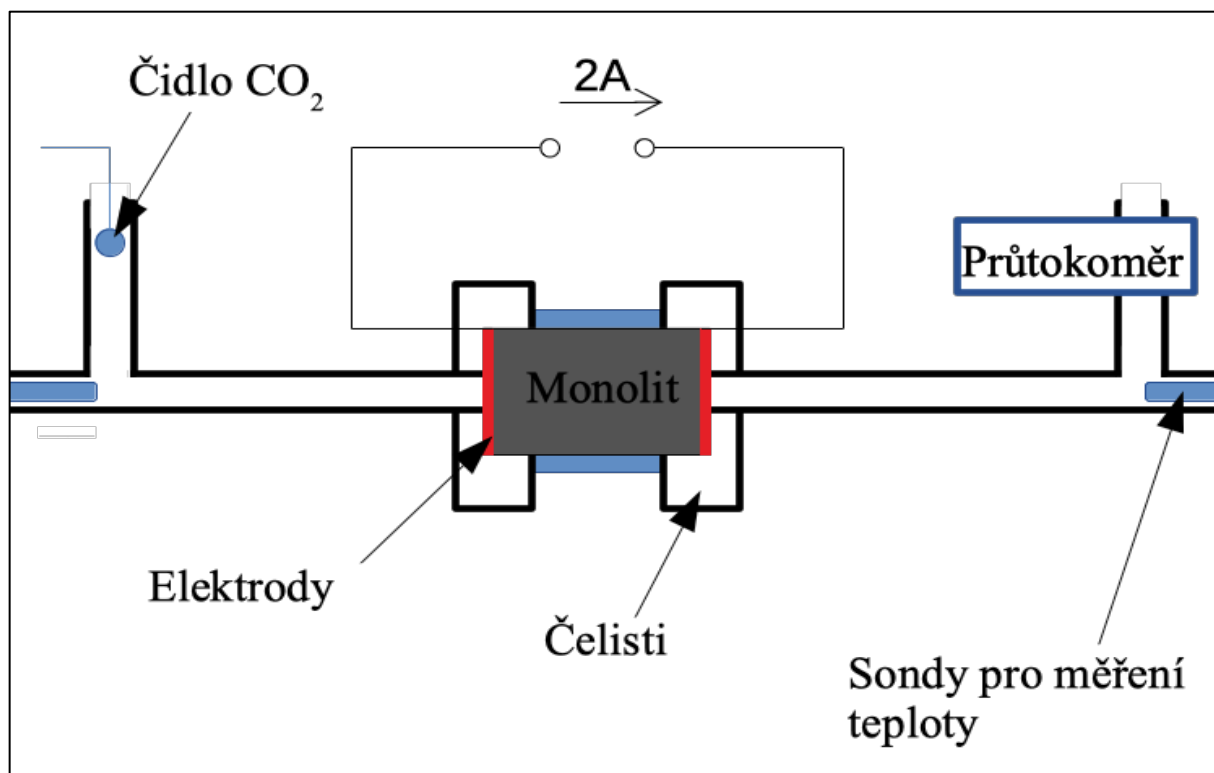
Experiment byl proveden tak, že na monolit aktivního uhlí byly z průtočných stran přiloženy elektrody, na elektrody byly následně přiloženy plastové čelisti, které v sobě měly otvor pro průtok vzduchu a další otvor pro kabel, kterým byl přiváděn elektrický proud. Čelisti zároveň izolovaly tepelné úniky do okolí. Ze zbylých stran byl monolit izolován ručně nařezanými kusy plexiskla. Čelisti k sobě byly přitlačovány dvěma šroubovým svěrkami. Čelist byla navržena v programu Creo. Výkres, podle kterého byla čelist vyrobena, je na *obrázku 4.14*.



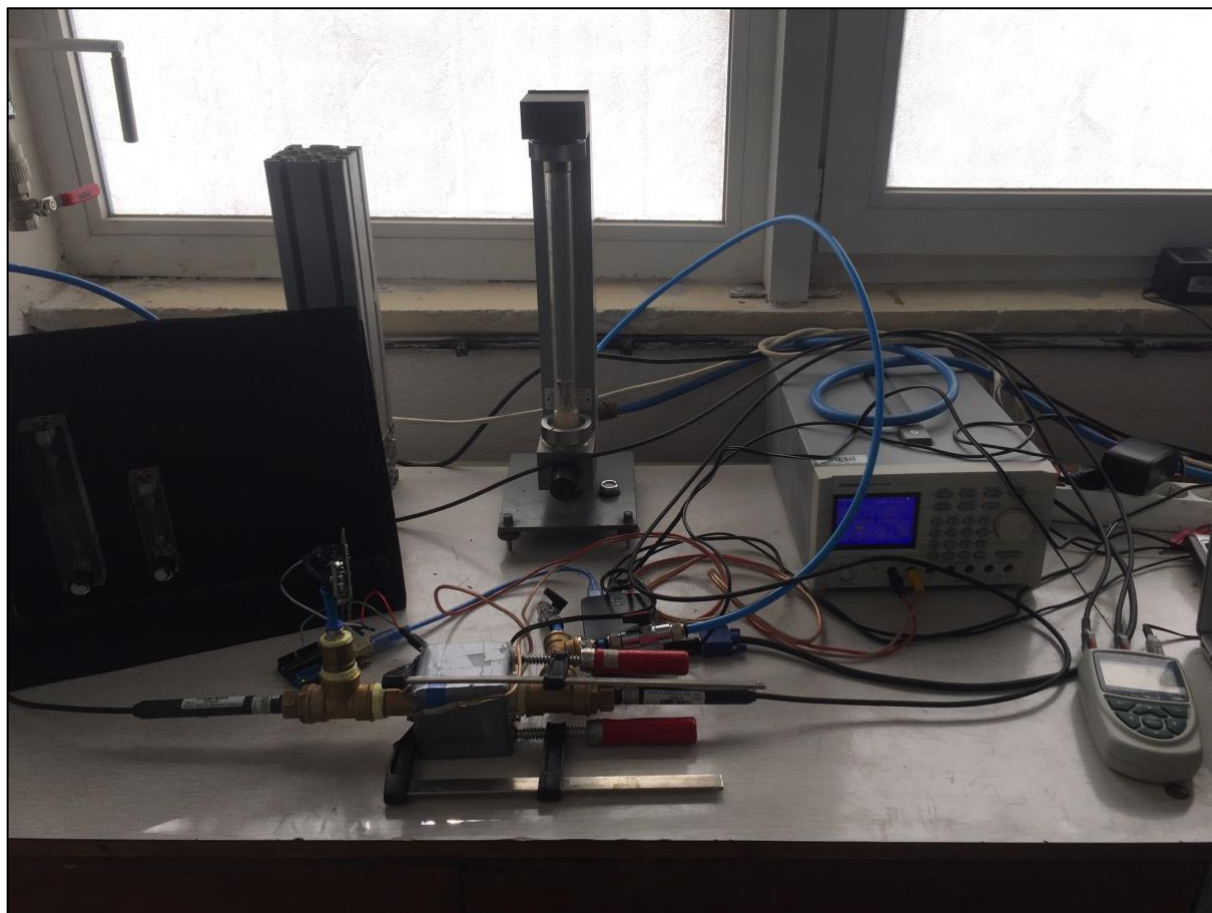
Obrázek 4.14 Výkres čelisti

Schéma experimentu je na *obrázku 4.15*. Do systému byl přiváděn vzduch s obsahem oxidu uhličitého. Množství vzduchu bylo regulováno průtokoměrem. Následně vzduch protekl kolem sondy k měření teploty. Poté protekl monolitem a dostal se opět k sondě pro měření teploty. Dále vzduch protékal kolem čidla na měření koncentrace CO_2 . Celý systém používaný při experimentu je vyfotografován na *obrázku 4.16*.

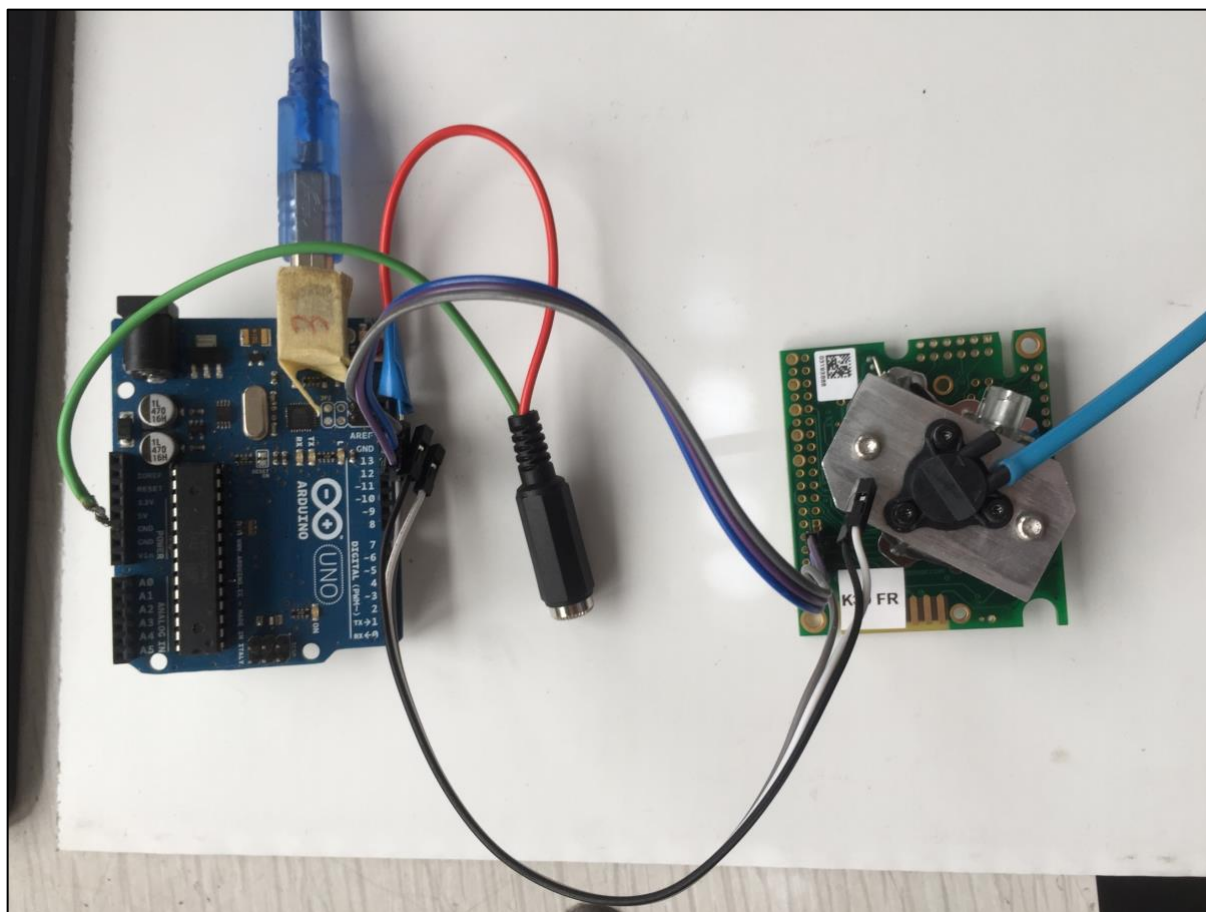
K měření teploty byly využity sondy Almemo FHAD36R s výrobcem udávanou přesností $0,2\text{ K}$ při $23^\circ\text{C} \pm 5\text{K}$. Pro měření koncentrace oxidu uhličitého bylo použito čidlo zobrazené na *obrázku 4.17*. Systém zaznamenával hodnoty koncentrace CO_2 po 1 s. Počítač se však po každé zaznamenané hodnotě vypnul a znovu zapnul. Časový interval z tohoto důvodu nebyl vždy přesně 1 s.



Obrázek 4.15 Schéma experimentu



Obrázek 4.16 Zapojení systému pro měření adsorpce a desorpce na monolitu



Obrázek 4.17 Čidlo pro zaznamenávání koncentrace CO₂.

4.3 PRŮBĚH A VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Výsledky experimentu byly zpracovávány v programu Microsoft Excel. Hodnoty teploty byly zaznamenávány po 30 sekundách. Hodnoty koncentrace oxidu uhličitého v protékajícím vzduchu byly zaznamenávány přibližně po 1s. Hodnoty byly vyhodnocovány v jednotkách *ppm* (parts per milion), které udávají, kolik částic oxidu uhličitého detekovala sonda v jednom milionu částic. Výsledky tohoto experimentu jsou prezentovány v *kapitole 4.3.1*. Experiment byl proveden celkem dvakrát, výsledky opakování experimentu jsou prezentovány v *kapitole 4.3.2*.

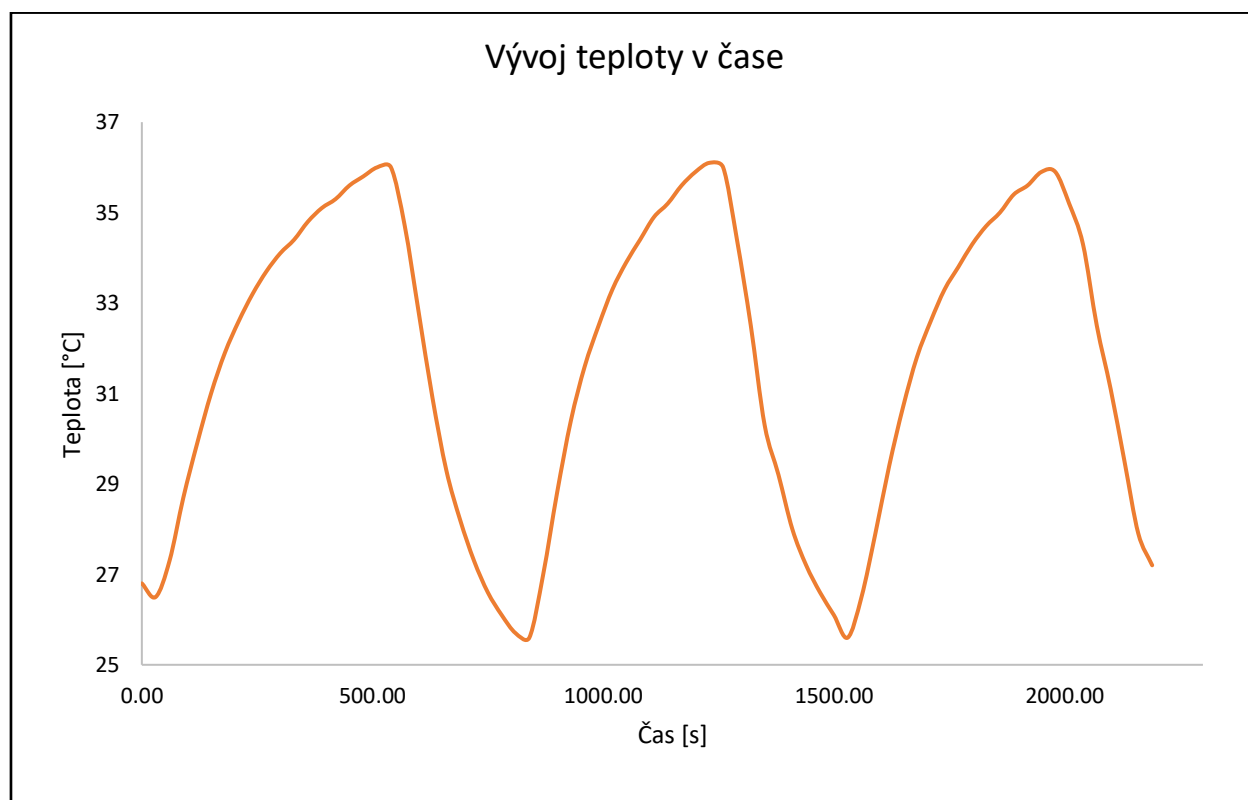
4.3.1 PRVNÍ EXPERIMENT

V této části experimentu bylo naměřeno chování koncentrace CO₂ během tří teplotních cyklů. Naměřeny byly celkem čtyři cykly, ale první, který vykazoval největší odchylku, byl následně při vyhodnocování dat odstraněn. Po těchto čtyřech cyklech došlo k přehřátí a následnému vypnutí zdroje elektrického proudu. Z těchto důvodů jsou ve vyhodnocení jen tři cykly. Teplota

v laboratoři na počátku experimentu byla $22,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, atmosférický tlak byl $975,2\text{ hPa}$ a relativní vlhkost dosahovala hodnoty 85% . Rozpětí minimální a maximální teploty bylo přibližně $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, vždy když teplota protékajícího vzduchu klesla pod hodnotu $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, počkalo se na doběhnutí časového intervalu odečítání hodnoty teploty (30 s), a následně byl zapnut zdroj elektrického proudu, kterým byly zahřívány elektrody. Když se teplota protékajícího vzduchu dostala přes hodnotu $36\text{ }^{\circ}\text{C}$, a současně doběhl půlminutový interval, byl naopak zdroj elektrického proudu vypnut. Interval $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ tak nebyl v každém cyklu přesný, a ovlivňovalo ho to, v jaké fázi půlminutového intervalu byla překročena hranice voleného rozpětí teplot. Teplota protékajícího vzduchu navíc po zapnutí zdroje elektrického proudu vždy ještě krátkou dobu klesala, a naopak po vypnutí zdroje teplota vždy ještě nějakou dobu stoupala.

Hodnota elektrického proudu protékajícího skrz elektrody byla nastavena na $1,5\text{ A}$ při napětí 15 V . Po zapnutí zdroje však napětí kleslo na $8,4\text{ V}$. Proud vzduchu, který protékal monolitem, byl průtokoměrem nastaven na hodnotu 1000 l/hod . Koncentrace CO_2 ve vzduchu vtékajícím do monolitu byla 425 ppm .

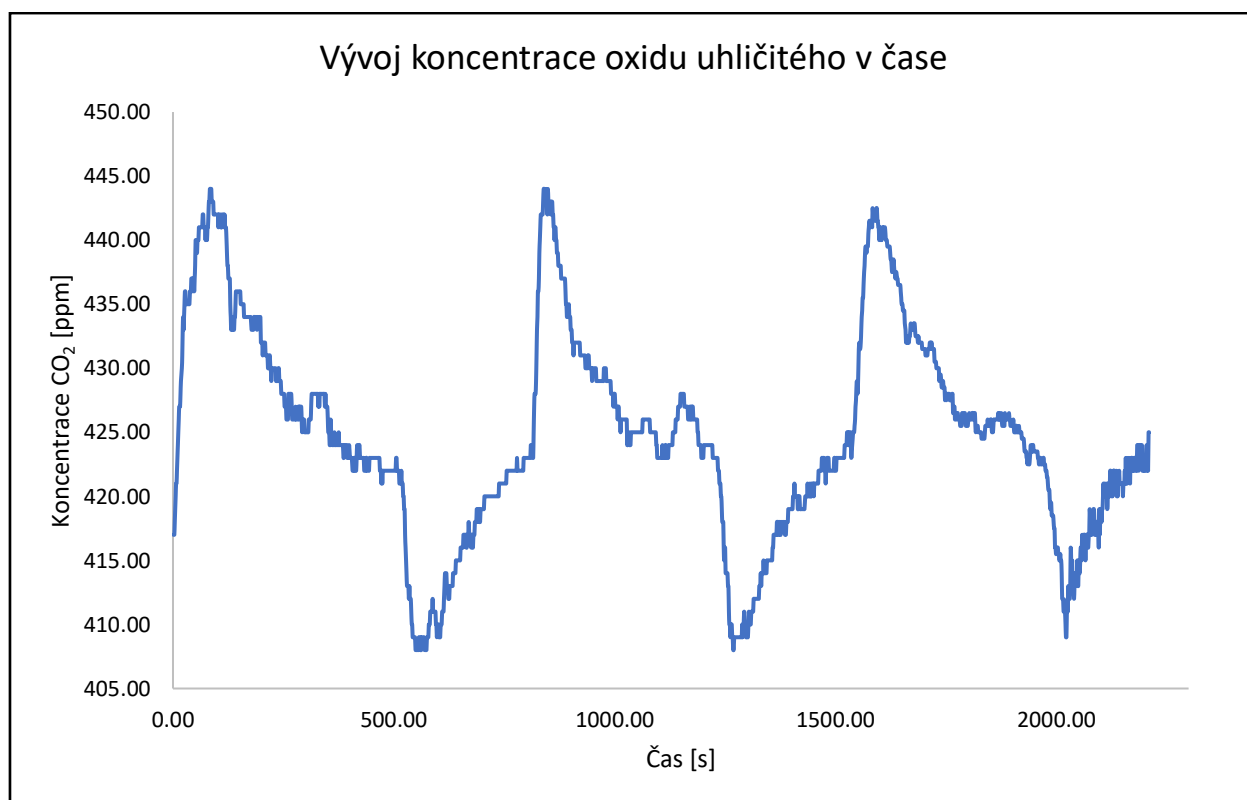
Na obrázku 4.18 je zobrazen graf s vývojem teploty v čase. Zároveň pomocí rovnice 1.16 bylo stanoveno teplo pro jednotlivé cykly. V tabulce 4.2 jsou doby zahřívání pro jednotlivé cykly, a následně i vypočtený čas. Hodnoty Jouleova tepla pro jednotlivé cykly jsou nahodilé a nevykazují žádný vývoj.



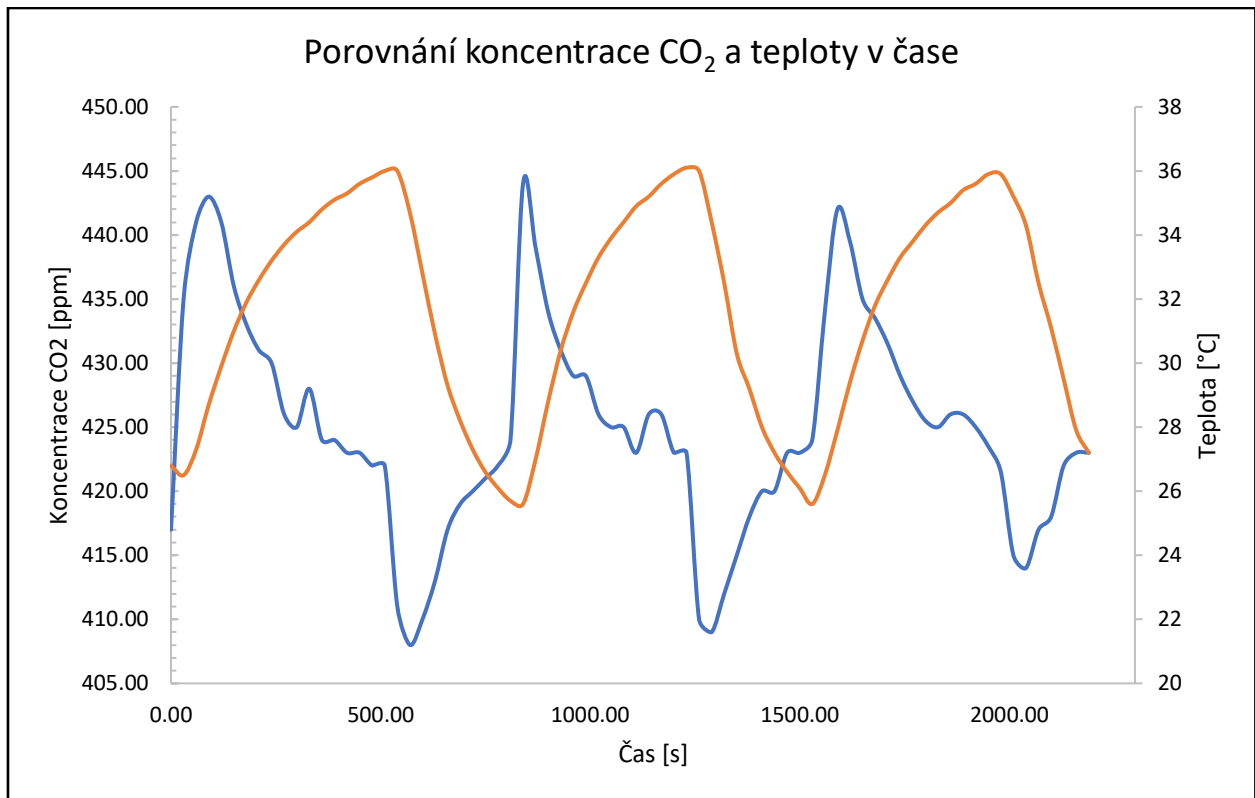
Obrázek 4.18 Vývoj teploty vzduchu protékajícího monolitem v čase

Tabulka 4.2 Jouleovo teplo v jednotlivých cyklech		
Cyklus	Čas	Jouleovo teplo
[-]	[s]	[kJ]
1	480,00	6,16896
2	420,00	5,39784
3	450,00	5,7834

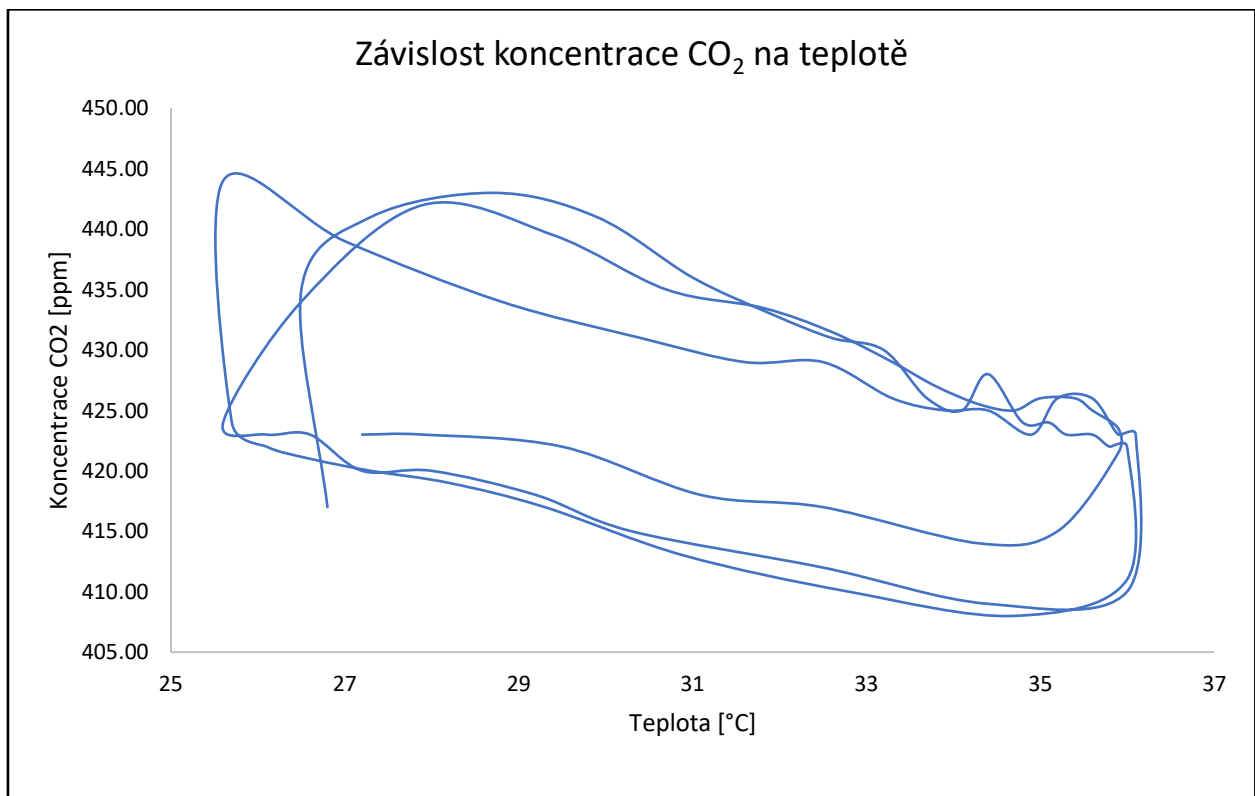
Na obrázku 4.19 je zobrazen graf s vývojem změny koncentrace CO₂ ve vzduchu protékajícím monolitem během experimentu. V grafu jsou zobrazena originální nevyhlazená data.



Obrázek 4.19 Vývoj koncentrace oxidu uhličitého v čase



Obrázek 4.20 Porovnání vývoje koncentrace CO₂ a teploty v čase



Obrázek 4.21 Závislost koncentrace CO₂ na teplotě

V grafu na *obrázku 4.20* je zobrazen zároveň vývoj koncentrace CO₂ a teploty v čase. Vývoj koncentrace je vyhlazen a v grafu jsou zobrazeny pouze hodnoty koncentrace ve stejných časech, ve kterých byla snímána teplota. Tyto hodnoty jsou zobrazeny i v tabulce *PŘÍLOHA 4*. Každý teplotní cyklus vykazuje ve vyobrazení koncentrace dva píky. Píkem je myšlen prudký výkyv koncentrace. Pík obsahující maximum představuje desorpci, která nastala při zahřívání monolitu, pík obsahující minimum pak znázorňuje adsorpci, která nastala po vypnutí zdroje elektrického proudu. Vývoj koncentrace v čase při teplotním cyklu je podrobně vysvětlen v kapitole 4.4.

Na *obrázku 4.21* je opět zobrazen vývoj koncentrace CO₂ v měřeném vzduchu, ale tentokrát v závislosti na teplotě. Ve všech teplotních cyklech vykazuje trend křivky vývoje koncentrace téměř stejný průběh, což je patrné jak z *obrázku 4.20*, tak z *obrázku 4.21*. Drobné odlišnosti jsou dány tím, že nebylo možné během experimentu zajistit stejnou minimální a maximální teplotu v jednotlivých cyklech. Mezi hodnotami teploty a koncentrace zároveň existuje určité zpoždění, které je dáno měřicí sondou teploty. Velikost tohoto zpoždění nebyla v experimentu určována.

Při vyhodnocování dat bylo následně zjišťováno, jestli se v jednotlivých cyklech mění hodnoty adsorbovaného a desorbovaného množství oxidu uhličitého. Hodnoty byly zjišťovány v pících, vždy od počátku píku do jeho maxima, respektive minima. Vypočtené hodnoty pro adsorpci jsou zaznamenány v *tabulce 4.3*, pro desorpci v *tabulce 4.4*.

Nejprve byl na daném úseku proveden integrální součet, čímž vznikla plocha pod křivkou až k nule. Hodnoty integrálních součtů jsou ve druhém sloupci *tabulek 4.3 a 4.4*. Dále byl sečten čas zkoumané oblasti dat (hodnoty v třetím sloupci *tabulek 4.3 a 4.4*). Pro určení reálně zachyceného množství bylo třeba mít stanoveno celkové množství oxidu uhličitého, které za daný čas do systému vstoupilo. (hodnoty ve čtvrtém sloupci *tabulek 4.3 a 4.4*). To bylo stanoveno také integrálním součtem. Hodnoty prvního a třetího sloupce od sebe byly následně odečteny, a tím bylo zjištěno množství adsorpce (resp. desorpce) v pících jednotlivých cyklů.

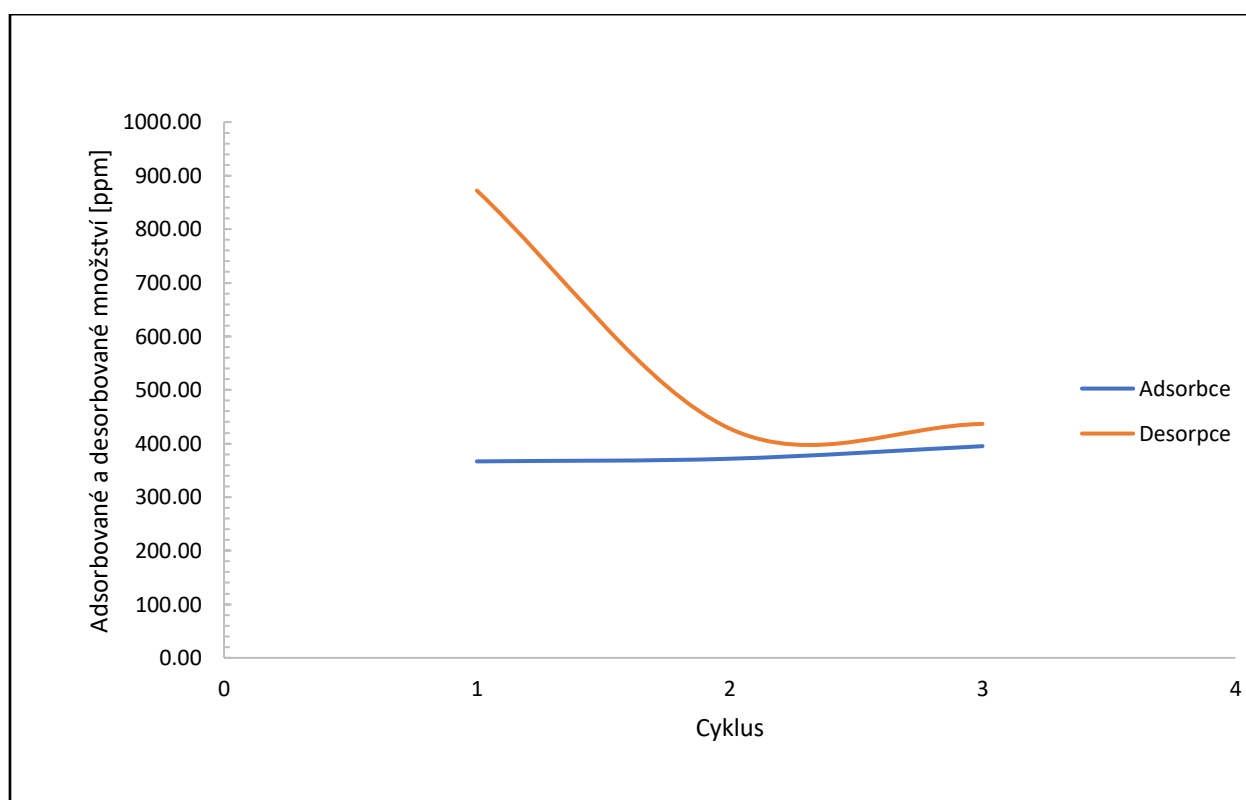
Na *obrázku 4.22* je graf zobrazující vývoj adsorbovaného a desorbovaného množství v jednotlivých pících. Na *obrázku 4.23* je pak graf zobrazující dobu trvání adsorpce a desorpce v pících jednotlivých cyklů. Z obou obrázků je patrné, že u adsorpce bylo adsorbované množství i čas adsorpce podobný. U desorpce byl čas v prvním cyklu delší než v druhých dvou cyklech, tím pádem se desorbovalo větší množství.

Vzhledem k rozdílným trváním adsorpce a desorpce, a tím pádem i rozdílnému adsorbovanému a desorbovanému množství CO₂, byla pro porovnání adsorpce a desorpce v jednotlivých smyčkách stanovena ještě rychlost adsorpce a desorpce. Ta byla stanovena jako podíl

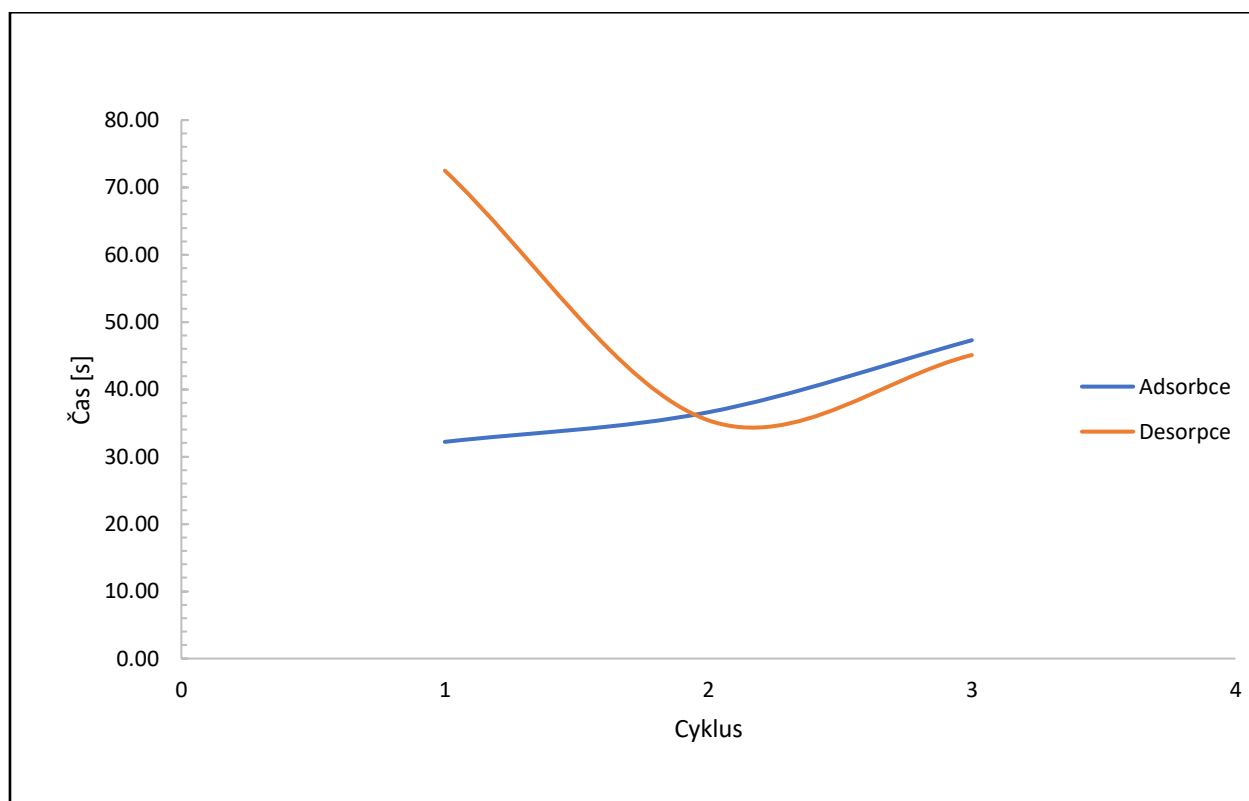
adsorbovaného, resp. desorbovaného množství (hodnoty v pátém sloupci *tabulek 4.3 a 4.4*) ku času adsorpce, resp. desorpce (hodnoty ve třetím sloupci *tabulek 4.3 a 4.4*). Hodnoty rychlosti adsorpce a desorpce v jednotlivých cyklech jsou v šestém sloupci *tabulek 4.3 a 4.4*, jejich vývoj je znázorněn v grafu na *obrázku 4.24*.

Tabulka 4.3 Vývoj koncentrace při adsorpci u jednotlivých cyklů					
Cyklus	Integrální součet	Čas	Průměrné množství	Adsorbované množství	Rychlost adsorpce
[-]	[ppm]	[s]	[ppm]	[ppm]	[ppm/s]
1	13318,3	32,20	13685,00	366,70	11,3881988
2	15183,4	36,60	15555	371,60	10,1530055
3	18772,45	47,30	19167,50	395,05	8,35200846

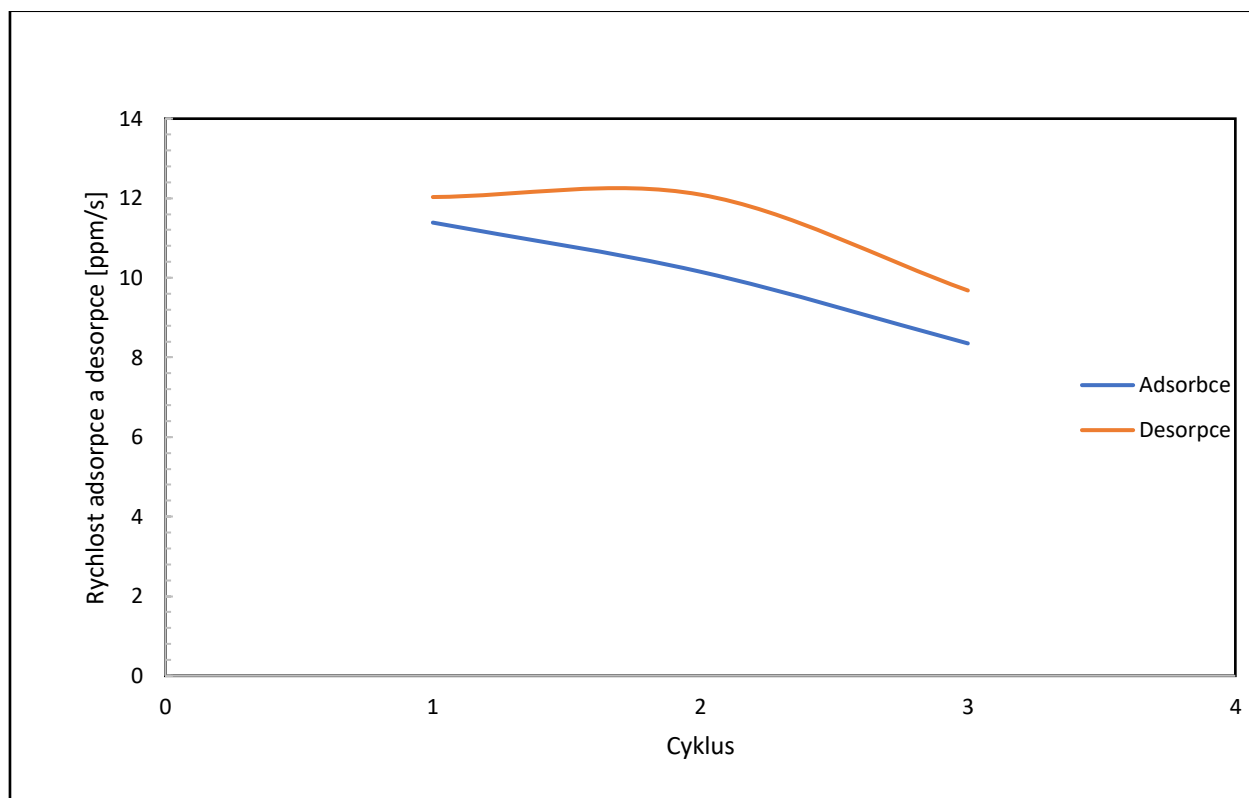
Tabulka 4.4 Vývoj koncentrace při desorpci u jednotlivých cyklů					
Cyklus	Integrální součet	Čas	Průměrné množství	Desorbované množství	Rychlost desorpce
[-]	[ppm]	[s]	[ppm]	[ppm]	[ppm/s]
1	31684,7	72,50	30812,5	872,2	12,0303448
2	15473	35,4	15045	428	12,0903955
3	19604,15	45,1	19167,5	436,65	9,68181818



Obrázek 4.22 Adsorbované a desorbované množství v pících jednotlivých cyklů



Obrázek 4.23 Čas adsorpce s desorpce v pících jednotlivých cyklů.



Obrázek 4.24 Rychlost adsorpce a desorpce v jednotlivých cyklech

Průměrná doba zahřívání monolitu byla 450 s, přičemž průměrné teplo k ohřátí jednoho cyklu bylo 5,78 kJ. Průměrná doba chladnutí byla 315 s. Průměrná maximální teplota, na kterou se zahřál vzduch protékající monolitem během jednotlivých cyklů, byla 36 °C, průměrná minimální teplota byla během jednotlivých cyklů 25,9 °C.

Průměr maxim koncentrace oxidu uhličitého naměřeného ve vzduchu, který protékal monolitem byl 443 ppm, průměr minim koncentrace byl 410,3 ppm.

U porovnání změn adsorpčních a desorpčních vlastností pro jednotlivé cykly se rychlost adsorpce a desorpce příliš neměnila. Průměrná rychlost adsorpce byla 9,96 ppm/s. Průměrná rychlost desorpce byla 11,27 ppm/s.

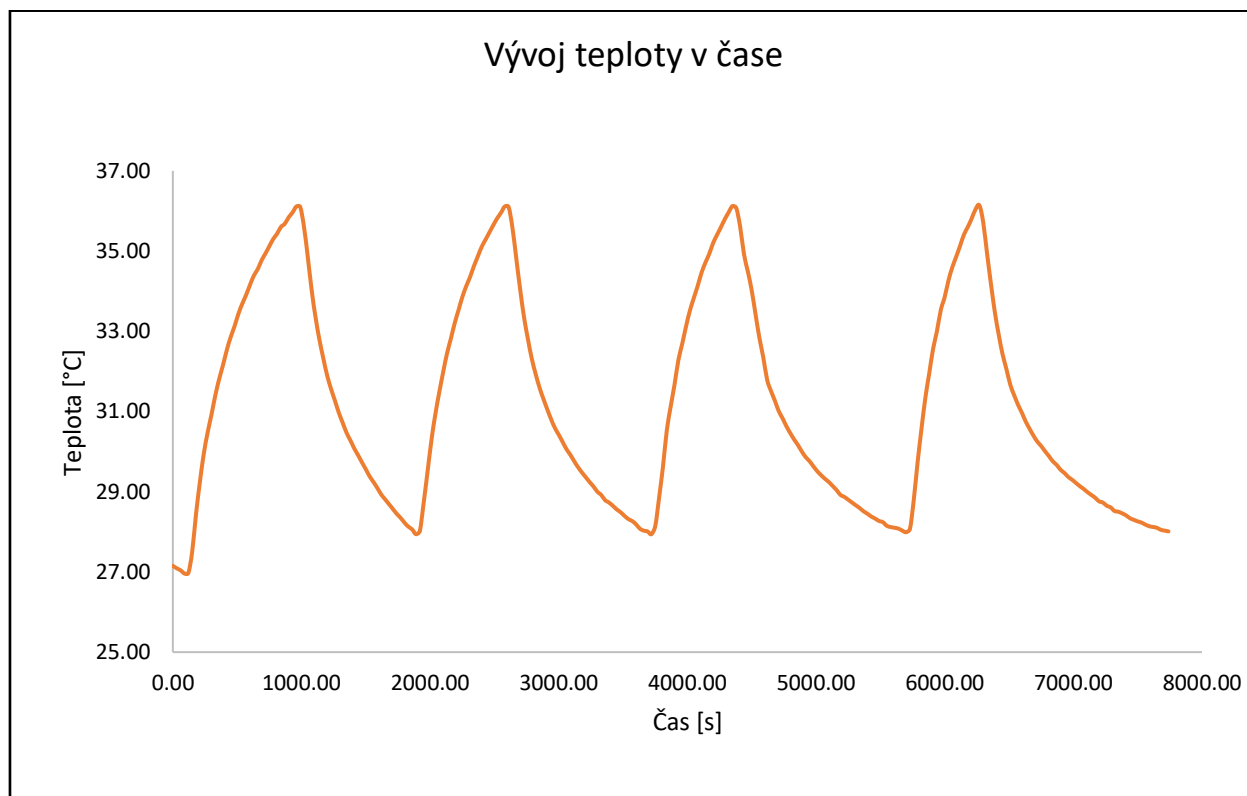
4.3.2 DRUHÝ EXPERIMENT

Experiment byl znovu opakován po čtyřech měsících s některými pozměněnými parametry. Teplota v laboratoři na počátku experimentu byla 24,4 °C, atmosférický tlak byl 970,0 hPa a relativní vlhkost dosahovala hodnoty 56%. Nižší vlhkost oproti prvnímu experimentu mohla mít vliv na adsorpční kapacitu, která mohla být tentokrát vyšší. V pórech adsorbentu dochází totiž ke kondenzaci par, a adsorpční kapacita se tak s rostoucí vlhkostí snižuje [2]. Kapacitu naopak mohlo snížit zanesení pórů nečistotami během období, kdy se mezi experimenty s monolitem nepracovalo, k potvrzení této myšlenky by ale bylo třeba zajistit stejné podmínky jako u prvního experimentu. Chování koncentrace CO₂ bylo naměřeno během čtyř teplotních cyklů. Cílem tentokrát bylo naměřit více cyklů, kvůli podmínkám okolí však jeden cyklus trval výrazně déle než v prvním případě, a naměřeno tak nakonec bylo šest cyklů. Dva z nich byly následně při vyhodnocování dat odstraněny. První z důvodu vyššího počátečního teplotního intervalu, další z důvodu chyby v datech, která se projevila náhlým vzrůstem koncentrace CO₂ na několik vteřin. Kvůli podmínkám okolí tak bylo tentokrát rozpětí minimální a maximální teploty od druhého cyklu přibližně 8 °C, vždy když teplota protékajícího vzduchu klesla pod hodnotu 28 °C, počkalo se na doběhnutí časového intervalu odečítání hodnoty teploty (30 s), a následně byl zapnut zdroj elektrického proudu, kterým byly zahřívány elektrody. Když se teplota protékajícího vzduchu dostala přes hodnotu 36 °C, a současně doběhl půlminutový interval, byl naopak zdroj elektrického proudu vypnut. Interval 8 °C tak opět nebyl v každém cyklu přesný.

Hodnota elektrického proudu protékajícího skrz elektrody byla nastavena na 1,5 A při napětí 15 V. Po zapnutí zdroje však napětí kleslo na 5,6 V. Proud vzduchu, který protékal monolitem,

byl průtokoměrem nastaven na hodnotu 1000 l/hod. Koncentrace CO₂ ve vzduchu vtékajícím do monolitu byla 353 ppm.

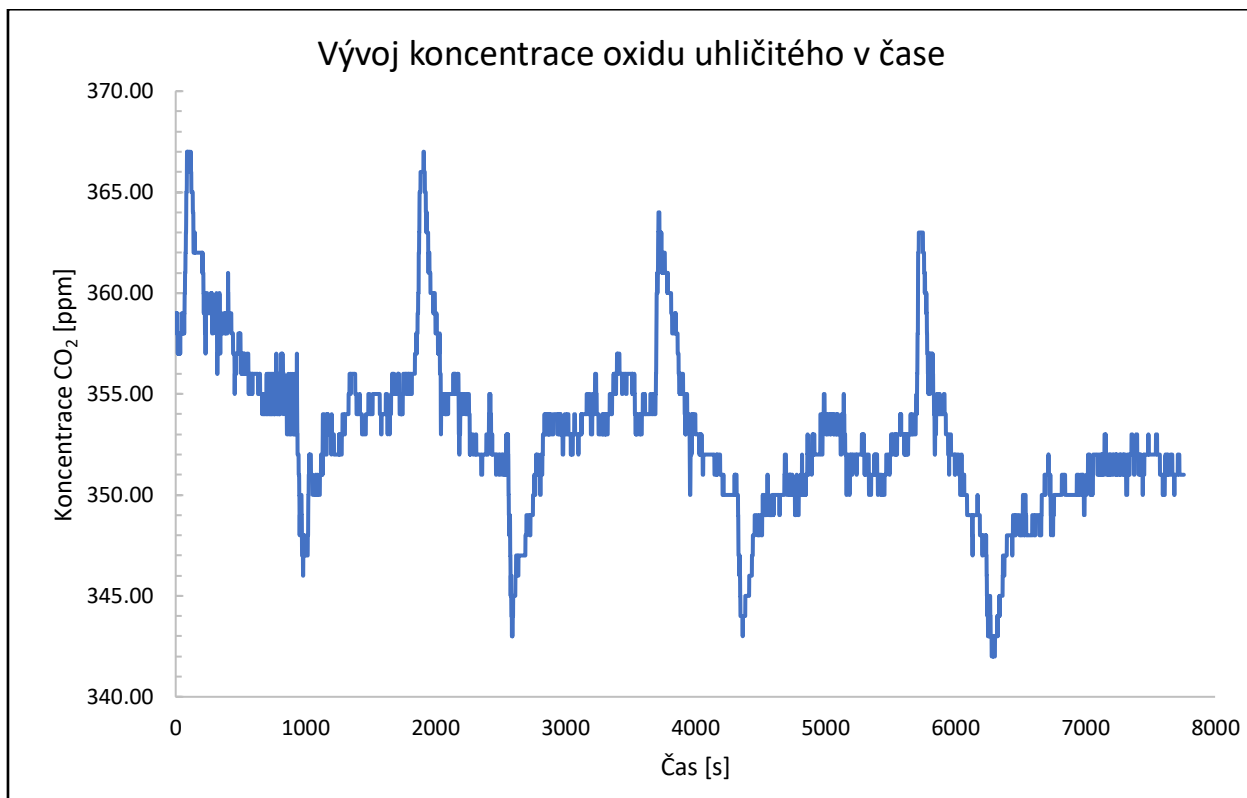
Na obrázku 4.25 je zobrazen graf s vývojem teploty v čase. Zároveň pomocí rovnice 1.16 bylo stanoveno teplo pro jednotlivé cykly. V tabulce 4.5 jsou doby zahřívání pro jednotlivé cykly, a následně i vypočtené teplo. Hodnoty Jouleova tepla pro jednotlivé cykly postupně klesají, protože se zároveň zkracovala doba ohřevu u jednotlivých cyklů.



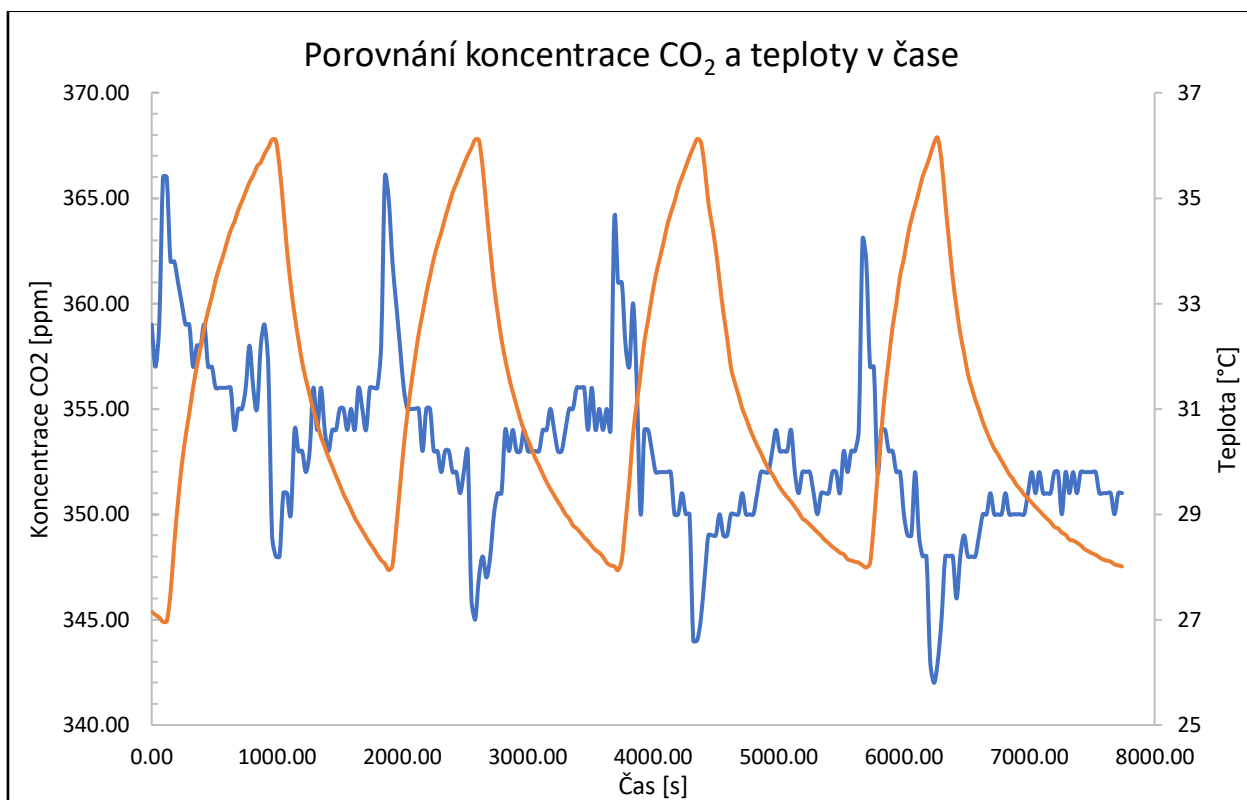
Obrázek 4.25 Vývoj teploty vzduchu protékajícího monolitem v čase

Tabulka 4.5 Jouleovo teplo v jednotlivých cyklech		
Cyklus	Čas	Jouleovo teplo
[-]	[s]	[kJ]
1	795,00	6,6362625
2	690,00	5,759775
3	630,00	5,258925
4	540,00	4,50765

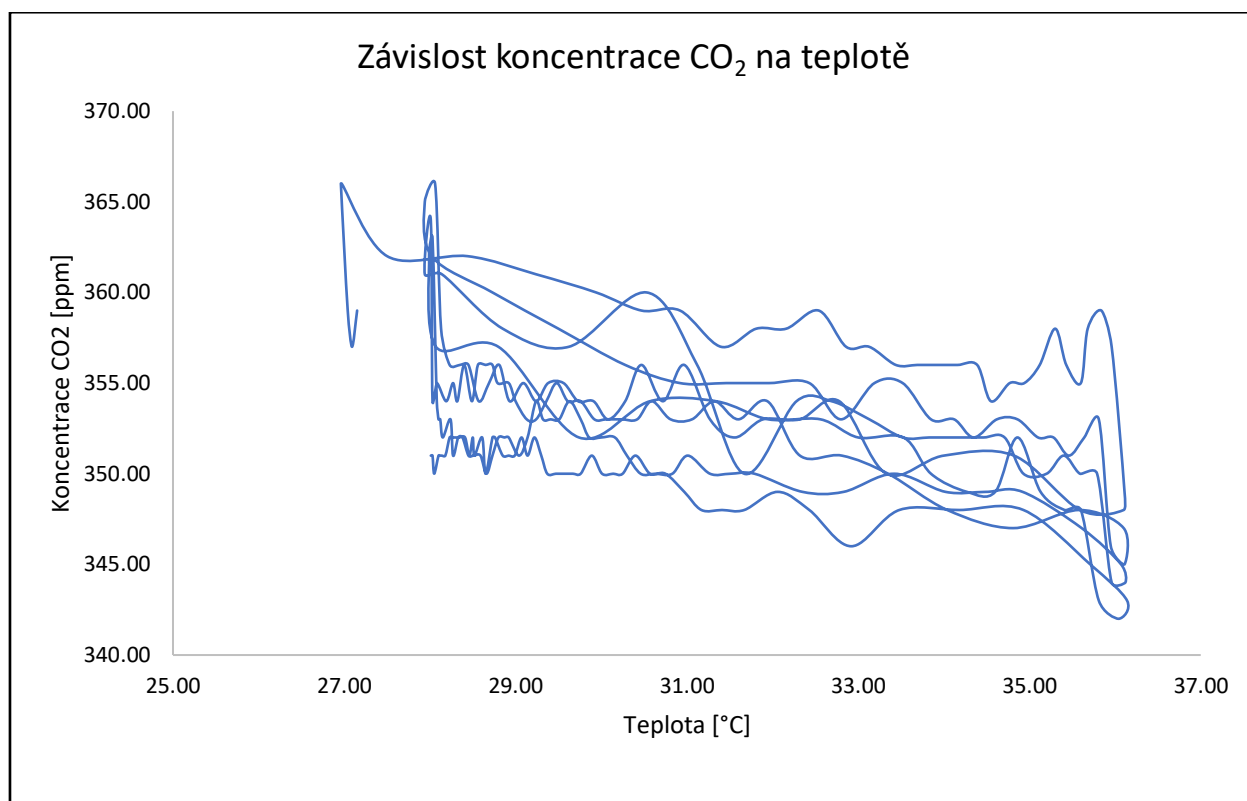
Na obrázku 4.26 je zobrazen graf s vývojem změny koncentrace CO₂ ve vzduchu protékajícím monolitem během experimentu. V grafu jsou zobrazena originální nevyhlazená data.



Obrázek 4.26 Vývoj koncentrace oxidu uhličitého v čase



Obrázek 4.27 Porovnání vývoje koncentrace CO₂ a teploty v čase



Obrázek 4.28 Závislost koncentrace CO₂ na teplotě

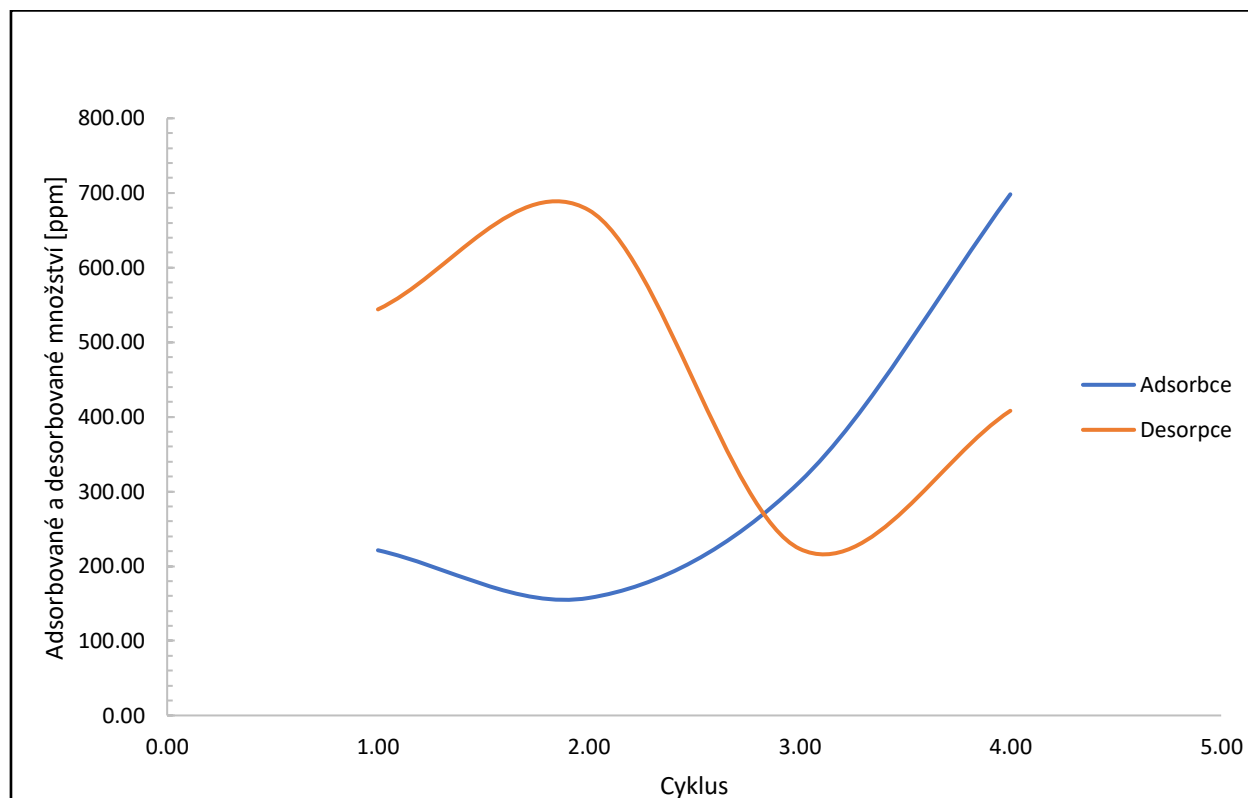
V grafu na *obrázku 4.27* je zobrazen zároveň vývoj koncentrace CO₂ a teploty v čase. Vývoj koncentrace je vyhlazen a v grafu jsou zobrazeny pouze hodnoty koncentrace ve stejných časech, ve kterých byla snímána teplota. Tyto hodnoty jsou zobrazeny i v tabulce *PŘÍLOHA 5*. Koncentrace v tomto případě v každém cyklu lehce klesala.

Na *obrázku 4.28* je opět zobrazen vývoj koncentrace CO₂ v měřeném vzduchu, ale tentokrát v závislosti na teplotě. Kvůli klesající koncentraci však není tento graf tak přehledný, jako v případě grafu na *obrázku 4.21*. Ve všech teplotních cyklech vykazuje trend křivky vývoje koncentrace opět podobný průběh, což je patrné hlavně z *obrázku 4.27*.

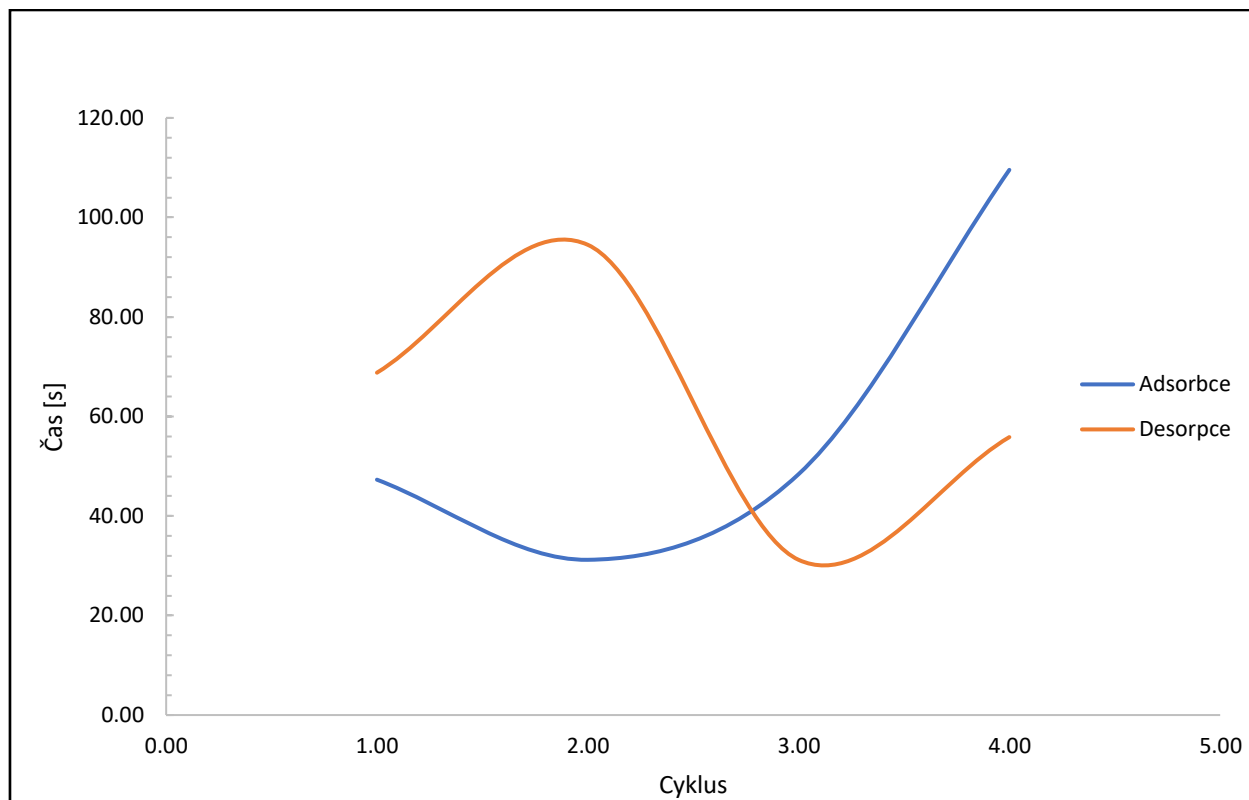
Hodnoty pro výpočet rychlosti adsorpce jsou uvedeny v *tabulce 4.6*, pro desorpce v *tabulce 4.7*. Na *obrázku 4.29* je graf zobrazující vývoj adsorbovaného a desorbovaného množství v jednotlivých pících. Na *obrázku 4.30* je pak graf zobrazující dobu trvání adsorpce a desorpce v pících jednotlivých cyklů. Z obou obrázků je patrné, že adsorpce probíhala nejkratší dobu ve druhém cyklu a nejdelší ve čtvrtém. Desorpce probíhala nejkratší dobu ve třetím cyklu a nejdelší ve druhém. Hodnoty rychlosti adsorpce a desorpce v jednotlivých cyklech jsou v šestém sloupci *tabulek 4.6* a *4.7*, jejich vývoj je znázorněn v grafu na *obrázku 4.31*.

Tabulka 4.6 Vývoj koncentrace při adsorpci u jednotlivých cyklů					
Cyklus	Integrální součet	Čas	Průměrné množství	Adsorbované množství	Rychlost adsorpce
[-]	[ppm]	[s]	[ppm]	[ppm]	[ppm/s]
1	17289,8	47,3	17511,1	221,3	4,68
2	10835,4	31,2	10992,8	157,4	5,04
3	16772,5	48,4	17085,2	312,7	6,46
4	37975,8	109,6	38673,9	698,1	6,37

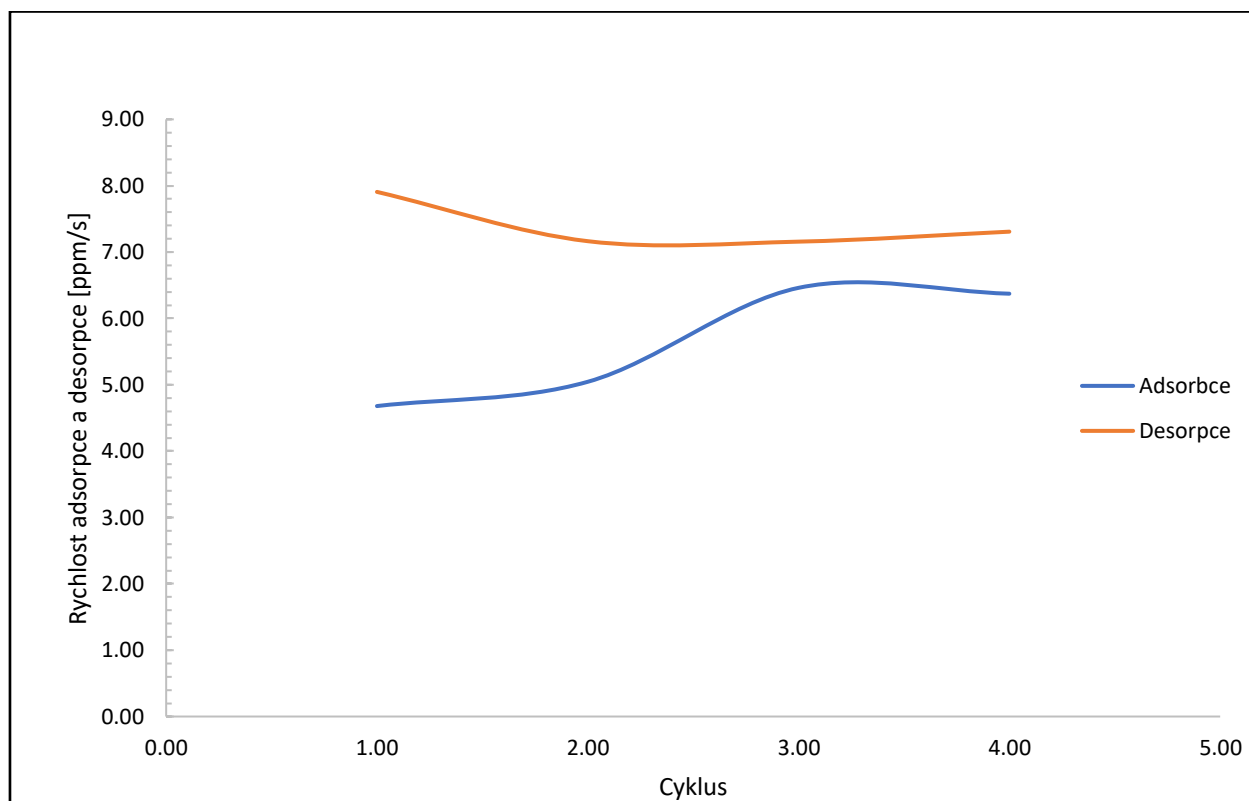
Tabulka 4.7 Vývoj koncentrace při desorpci u jednotlivých cyklů					
Cyklus	Integrální součet	Čas	Průměrné množství	Desorbované množství	Rychlost desorpce
[-]	[ppm]	[s]	[ppm]	[ppm]	[ppm/s]
1	24830,4	68,8	24286,4	544,0	7,91
2	32552,9	94,5	31875,9	677,0	7,16
3	11236,9	31,2	11013,6	223,3	7,16
4	20124,2815	55,9	19716,1	408,2	7,31



Obrázek 4.29 Adsorbované a desorbované množství v pících jednotlivých cyklů



Obrázek 4.30 Čas adsorpce s desorpce v pících jednotlivých cyklů.



Obrázek 4.31 Rychlost adsorpce a desorpce v jednotlivých cyklech

Průměrná doba zahřívání monolitu byla 663,8 s, přičemž průměrné teplo k ohřátí jednoho cyklu bylo 5,54 kJ. Průměrná doba chladnutí byla 1271,3 s. Průměrná maximální teplota, na kterou se zahřál vzduch protékající monolitem během jednotlivých cyklů, byla 36,12 °C, průměrná minimální teplota byla během jednotlivých cyklů 27,97 °C.

Průměr maxim koncentrace oxidu uhličitého naměřeného ve vzduchu, který protékal monolitem byl 364,8 ppm, průměr minim koncentrace byl 344,8 ppm.

U porovnání změn adsorpčních a desorpčních vlastností pro jednotlivé cykly se rychlost adsorpce a desorpce příliš neměnila. Průměrná rychlost adsorpce byla 5,64 ppm/s. Průměrná rychlost desorpce byla 7,38 ppm/s.

4.3.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ OBOU EXPERIMENTŮ

Při obou experimentech hrála výraznou roli okolní teplota. Experimenty tak byly ovlivněny tím, že jeden byl proveden v prosinci, zatímco druhý v dubnu, kdy teplota v místnosti byla vyšší. Kvůli času tak byla ve druhém experimentu zvýšena spodní hranice teploty z 26 °C na 28 °C. Vychladit monolit na teplotu 26 °C by totiž bylo časově velmi náročné. I tak ale druhý experiment byl více než třikrát delší. Adsorpční a desorpční chování při zahřívání a ochlazování však bylo stejné. Rychlost adsorpce i desorpce byla v prvním experimentu vyšší. Teplo dodané do monolitu na jeden cyklus bylo v obou experimentech podobné.

4.4 POPIS VÝVOJE KONCENTRACE CO₂ V ZÁVISLOSTI NA TEPLITĚ

Pro popis chování monolitu při zahřívání a následném ochlazování byl vybrán druhý cyklus zahřívání a ochlazování z prvního experimentu (druhý cyklus na *obrázku 4.20*). Ostatní cykly se však chovají stejně, takže lze na tomto jednom demonstrovat adsorpční vlastnosti monolitu v závislosti na jeho zahřívání a ochlazování. Vybraný cyklus je zobrazen na *obrázku 4.32* a *obrázku 4.33*.

Proces zahřívání v tomto cyklu trval 390 s a vzduch protékající monolitem se během této doby ohřál o 10,5 °C z teploty 25,6 °C na teplotu 36,1 °C. Proces chladnutí následně trval 300 s. Monolit během této doby vychladl o 10,5 °C, opět na teplotu 25,6 °C. Maximální koncentrace CO₂ v měřeném vzduchu byla v tomto cyklu 444 ppm, minimální byla 409 ppm.

Na *obrázku 4.32* není bod A na křivce koncentrace ve stejném čase jako bod A na křivce teploty. Z toho je patrné, že mezi hodnotami teploty a koncentrace je zpoždění δ .

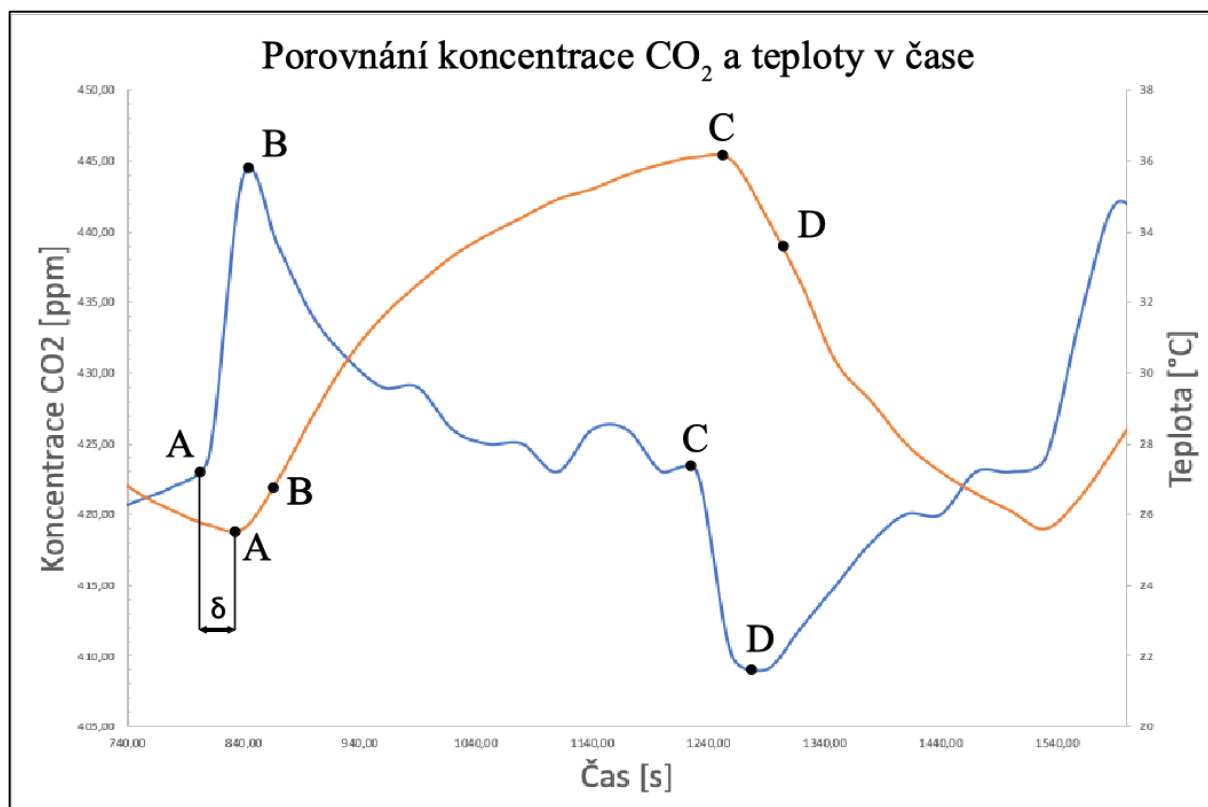
V bodě A byl zapnut zdroj elektrického proudu, který zahříval monolit. Z monolitu se následně uvolňovaly adsorbované částice oxidu uhličitého. Koncentrace oxidu uhličitého v měřeném vzduchu rostla až do bodu B. V bodu B byl monolit plně regenerován a neobsahoval žádné adsorbované množství oxidu uhličitého, který by se mohl uvolňovat. Z grafu na *obrázku 4.32* je patrné, že se adsorbovaný oxid uhličitý uvolnil z monolitu ve velmi krátkém čase od počátku zahřívání. Zároveň k tomu stačila malá teplotní změna. Teplotní křivka mezi body A a B má rostoucí gradient.

Od bodu B začala koncentrace CO_2 v měřeném vzduchu klesat. Ze začátku klesá křivka koncentrace strmě, protože docházelo k odtečení desorbovaných molekul CO_2 . Poté, co tyto molekuly odtekly, se však koncentrace CO_2 v měřeném vzduchu moc neměnila. Před bodem C tak lze pozorovat, že občas se nějaké molekuly CO_2 adsorbují, následně zase desorbují, ale koncentrace klesá velmi pozvolna. Teplotní gradient je mezi body B a C klesající. Křivka se tak v bodě B mění z konvexní na konkávní. Zároveň koncentrace CO_2 v měřeném vzduchu dosahuje v bodě B svého maxima.

V bodě C byl vypnut zdroj elektrického proudu, a monolit se začal ochlazovat. To mělo za následek, že začal opět velmi rychle adsorbovat molekuly oxidu uhličitého, a měřený vzduch tak vykazoval prudký pokles koncentrace CO_2 . V bodě D však adsorpce na monolitu ustala, a koncentrace oxidu uhličitého v měřeném vzduchu se tak opět začala zvyšovat. To je nejprve dáno tím, že během adsorpce obsahoval protékající vzduch mnohem méně molekul CO_2 , které se tak nedostaly k sondě CO_2 , protože byly zachyceny na povrchu monolitu. Poté však vzduch se sníženou koncentrací CO_2 odtekl a protékající vzduch opět obsahoval podobné množství oxidu uhličitého jako v bodě A a C. A opět docházelo k situaci jako před bodem C, kdy se občas nějaké molekuly zachytily, a občas zase uvolnily, koncentrace si však držela podobnou hodnotu.

Mezi body C a D má křivka teploty záporný gradient, který klesá. Od bodu D je sice gradient stále záporný, ale roste. Křivka se tak v bodě D mění z konkávní na konvexní. Koncentrace oxidu uhličitého dosahuje v bodě D svého minima.

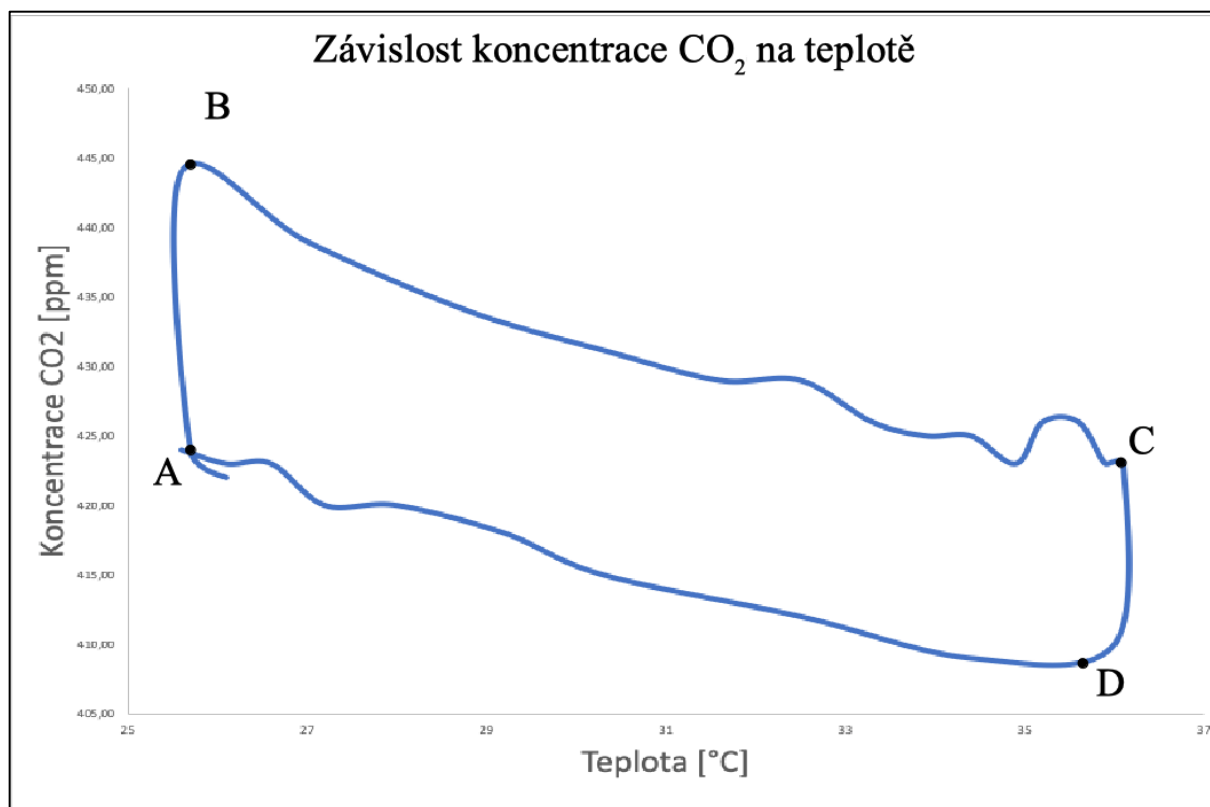
Z celého průběhu se daly vyzpat některé jevy. První z nich je, že pokud gradient teploty stoupal, koncentrace oxidu uhličitého v měřeném vzduchu také stoupala. Pokud gradient teploty naopak klesal, koncentrace oxidu uhličitého také klesala. Tam kde gradient teploty přestal stoupat a začal klesat měla křivka koncentrace své maximum, naopak tam, kde přestal klesat a začal stoupat, měla křivka koncentrace své minimum. Zároveň čím menší byla změna teploty, tím menší byla i změna koncentrace.



Obrázek 4.32 Zobrazení jednoho cyklu vývoje koncentrace CO₂ a teploty v čase. V bodě A) je spuštěno zahřívání a dochází k desorpci (nárůst koncentrace ve vzduchu), v bodě B) je uvolněno adsorbované množství a koncentrace CO₂ se opět vrací na střední hodnotu. V bodě C) je vypnuto zahřívání a dochází k adsorpci (pokles koncentrace ve vzduchu), v bodě D) je koncentrace CO₂ ve vzduchu minimální.

Výše popsáný jev je dobře pozorovatelný také v grafu na *obrázku 4.33*. Na vyobrazené křivce děj probíhal ve směru hodinových ručiček. Mezi body A a B vzrostla teplota jen nepatrně, ale koncentrace se změnila významně. Následně mezi body B a C se hodnota koncentrace CO₂ vrátila na podobnou hodnotu jako v bodě A, ovšem za daleko větší teplotní změny. Od bodu C začala teplota klesat. Mezi body C a D došlo k významnému poklesu koncentrace CO₂ v měřeném vzduchu. Tato změna zároveň proběhla při malé změně teploty. Následně začala koncentrace CO₂ opět stoupat až na hodnotu podobnou hodnotě koncentrace v bodě A a C, ovšem při výraznější změně teploty.

Body A, B, C a D na *obrázku 4.32* a *obrázku 4.33* odpovídají stejným stavům.



Obrázek 4.33 Zobrazení jednoho cyklu závislosti koncentrace CO₂ na teplotě

Výše popsáný vývoj koncentrace oxidu uhličitého v měřeném vzduchu, který protékal monolitem, lze pozorovat na všech naměřených teplotních cyklech.

ZÁVĚR

V práci bylo zkoumáno adsorpční a desorpční chování monolitu aktivního uhlí při zahřívání a následném ochlazování. Adsorpce je proces, kdy jsou částice plynu zachytávány na povrchu jiné látky. V práci byl zachytáván oxid uhličitý.

První kapitola slouží k nastínění a pochopení jevu adsorpce a desorpce, kdy jsou představeny principy tohoto jevu, matematický popis, a způsoby, kterými lze dosáhnout desorpce. Druhá kapitola slouží k představení vlastností aktivního uhlí – adsorbentu užitého v práci. Je popsán způsob jeho výroby, a také jsou představeny některé další v praxi často využívané adsorbenty. Třetí kapitola poskytuje krátký vhled do využití simulačních systémů v této problematice.

Ve čtvrté kapitole je prezentována příprava experimentu, a následně jeho výsledky. Podařilo se sestavit a zprovoznit experimentální ověřovací model na měření adsorpce a desorpce na aktivním uhlí, což bylo cílem této práce. Tento experimentální model umožňoval zahřívání monolitu, a tím sledování vlivu teploty na jeho adsorpční a desorpční chování. Experiment byl proveden dvakrát, přičemž obě dvě měření od sebe dělilo pět měsíců. U obou experimentů bylo naměřeno několik smyček za sebou, čímž se prokázala opakovatelnost adsorpčního a desorpčního chování monolitu.

U obou experimentů vykazovala křivka chování adsorpce a desorpce stejný vývoj. Při zahřívání adsorbentu se velmi rychle desorbovalo zachycené množství oxidu uhličitého, čímž vzrostla jeho koncentrace v protékaném vzduchu. Následně se však velmi rychle vracela zpět k průměrným hodnotám koncentrace. Naopak při vypnutí zahřívacího systému začal monolit velmi rychle adsorbovat CO_2 , což se projevilo poklesem jeho koncentrace v protékajícím vzduchu. Velmi rychle se však koncentrace opět vracela k průměrným hodnotám. Největší změny v koncentraci CO_2 probíhaly vždy v krátkém časovém úseku po zapnutí či vypnutí zdroje elektrického proudu, kterým byl monolit zahříván. Byl získán popis adsorpčního a desorpčního chování monolitu v závislosti na teplotě, což bylo také cílem práce. Získané chování je v souladu s očekáváním i s již částečně ověřenými výsledky. Oproti některým předchozím pracím, které se zabývaly podobným tématem, tj. adsorpcí a desorpcí na aktivním uhlí, nabízí tato práce variantu levně a dostupně sestavitelného modelu, který je navíc ověřen v několika cyklech za sebou, a i s určitým časovým odstupem. Práce také nabízí oproti předchozím pracím v této oblasti nový způsob, jak porovnat adsorpční a desorpční vlastnosti monolitu v jednotlivých cyklech, a to pomocí rychlosti adsorpce a desorpce.

Ačkoliv adsorpční a desorpční chování obou experimentů vykazovalo stejný průběh, opakování přesto ukázalo limity experimentu a další možnosti, jak experiment v budoucnu posunout.

Časovým odstupem mezi oběma experimenty byly dány i jejich rozdílné okolní podmínky – především teplota okolí, ale také rozdílná vlhkost a atmosférický tlak. První experiment probíhal v prosinci, a daleko lépe se tak chladil, protože při větrání laboratoře byla okolní teplota nižší, a byla vyšší vlhkost vzduchu. Druhý experiment probíhal v dubnu, a chlazení trvalo díky teplotě okolí a vlhkosti výrazně déle, což nakonec vedlo k volbě rozdílných intervalů teploty pro oba experimenty. Zajištění stejných podmínek v obou případech by bylo možné docílit provedením experimentu v klimatizované komoře, kde lze experiment zopakovat za stejné teploty a vlhkosti. Pro zajištění stejných podmínek by také bylo potřeba sytit protékající vzduch oxidem uhličitým na konstantní hodnotu před vstupem do modelu.

Experiment byl bylo dále možné rozšířit o zkoumání adsorpčního a desorpčního chování při stejné teplotní změně, ale různých vlhkostech, čímž by bylo možné získat představu o adsorpčním a desorpčním chování monolitu nejen v závislosti na teplotních změnách, ale také na vlhkosti. Také by bylo možné posouvat teplotní interval do vyšších či nižších hodnot a zkoumat tak adsorpční chování v různých teplotách.

Zároveň by bylo možné zjišťovat adsorpční a desorpční rychlost na více smyčkách, čímž by se zjistilo, jestli se tato rychlost při větším množství teplotních cyklů za sebou mění, a jestli se tak mění i adsorpční schopnosti monolitu. K většímu počtu smyček by ale bylo třeba zkrátit časy jednotlivých smyček, tedy zajistit rychlejší chlazení, např. opět pomocí klimatizované komory, či zmenšení teplotního intervalu všech smyček.

Další možností, jak práci dále rozšířit, by mohlo být provedení numerických simulací adsorpčního a desorpčního chování v monolitu. Z důvodu rozsahu se však práce tomuto způsobu nevěnovala.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KODÍČEK, Milan, ed. *Slovník chemických pojmů* [online]. VŠCHT Praha, 2014 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-007/#p_title
- [2] MÍKA, Vladimír a Lubomír NEUŽIL. *Chemické inženýrství II*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-7080-359-2.
- [3] HASAL, Pavel, Igor SCHREIBER a Dalimil ŠNITA. *Chemické inženýrství I*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007. ISBN 978-80-7080-629-6.
- [4] *Fyzikální chemie: bakalářský a magisterský kurz*. Druhý svazek. ISBN 978-80-7080-675-3.
- [5] ATKINS, P. W. a Julio DE PAULA. *Fyzikální chemie*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013, xxvi, 915 s. ISBN 978-80-7080-830-6.
- [6] VRBOVÁ, Veronika a Karel CIAHOTNÝ. *Testování adsorpčních materiálů pro odstranění CO₂ z bioplynu*. VŠCHT Praha, 2013.
- [7] BULÁNEK, Roman. *Povrchové jevy na pevných látkách*. Pardubice: Univerzita Pardubice, [2015], 1 online zdroj (116 stran). ISBN 978-80-7395-908-1.
- [8] TAE, Soo Lee, Hwan Chy SUK a Hyuk Cho JUNG. Carbon dioxide removal using carbon monolith as electric swing adsorption to improve indoor air quality. *Building and Environment*. 2015. Elsevier, 2015.
- [9] R., Ben-Mansour, Habib M. A., Bamidele O. E., Basha M., Qasem N. A. A., Peedikakkal A., Laoui T. a Ali M. Carbon capture by physical adsorption: Materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations – A review. *Applied Energy*. Saudi Arabia: Elsevier, 2015.
- [10] GRUHN, Günter, Wolfgang FRATZSCHER a Eberhard HEIDENREICH. *Chemické inženýrství*. Přeložil Josef KOUBEK. Praha: SNTL, 1990, 485 s. Oborové encyklopedie. ISBN 80-03-00183-8.
- [11] [Http://www.terminalia-catappa.net](http://www.terminalia-catappa.net) [CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>)]. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04 10]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon_activado.png

- [12] Self (en:User:Ravedave) [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)]. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Activated_Carbon.jpg
- [13] PECHOUŠEK, Jiří. Měření plochy povrchu pevných látek a určování jejich porozity metodou sorpce plynu. [online]. 2010, s. 19 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/ostatni/BET.pdf>
- [14] SMÍŠEK, Milan a Slavoj ČERNÝ. *Aktivní uhlí*. Praha: SNTL, 1964, 322 s.
- [15] EVA, Jurková, Ciahotný KAREL a Lepková KATEŘINA. TESTOVÁNÍ ADSORBENTŮ PRO ODSTRAŇOVÁNÍ ORGANICKÝCH LÁTEK Z ODPADNÍCH PLYNŮ. *Chemické Listy*. Praha: VŠCHT, 2005, **2005**(99), 431 - 436.
- [16] HŘEBÍČEK, Jiří a Michal ŠKRDLA. *Úvod do matematického modelování*. Brno: Masarykova Universita, 2006. 83 s. *Učebnice Úvod do matematického modelování*
- [17] YUANLONG, Huanga a Seinfeldb JOHN H. A note on flow behavior in axially-dispersed plug flow reactors with step input of tracer. *Atmospheric Environment*. Elsevier, 2019, (X).

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Průběh průměrné teploty v čase při prohřívání elektrodou č. 1

Příloha 2 Průběh průměrné teploty v čase při prohřívání elektrodou č. 2

Příloha 3 Průběh průměrné teploty v čase při prohřívání elektrodou č. 3

Příloha 4 Hodnoty teploty a koncentrace v čase při experimentu č. 1

Příloha 5 Hodnoty teploty a koncentrace v čase při experimentu č. 2

PŘÍLOHY

Příloha 1 Průběh průměrné teploty v čase při prohřívání elektrodou č. 1							
teplejší strana				chladnější strana			
čas	teplota	čas	teplota	čas	teplota	čas	teplota
t	T _{průměrná}	t	T _{průměrná}	t	T _{průměrná}	t	T _{průměrná}
[s]	[°C]	[s]	[°C]	[s]	[°C]	[s]	[°C]
0	26,9	300	49,3	0	26	300	33
30	33,4	330	50,1	30	26,7	330	33,5
60	36,8	360	50,9	60	27,6	360	34
90	39,7	390	51,4	90	28,6	390	34,4
120	41,8	420	52	120	29,2	420	35
150	43,7	450	52,5	150	30	450	35,3
180	45	480	52,8	180	30,7	480	35,8
210	46,3	510	53,2	210	31,3	510	36,2
240	47,5	540	53,5	240	31,9	540	36,6
270	48,4	570	53,8	270	32,4	570	37,2

Příloha 2 Průběh průměrné teploty v čase při prohřívání elektrodou č. 2							
teplejší strana				chladnější strana			
čas	teplota	čas	teplota	čas	teplota	čas	teplota
t	T _{průměrná}	t	T _{průměrná}	t	T _{průměrná}	t	T _{průměrná}
[s]	[°C]	[s]	[°C]	[s]	[°C]	[s]	[°C]
0	26,3	300	46,6	0	25,2	300	32,8
30	30,2	330	47,6	30	25,9	330	33,3
60	33	360	48,6	60	26,8	360	33,9
90	35,3	390	49,5	90	27,5	390	34,5
120	37,4	420	50,1	120	28,6	420	35,1
150	39,2	450	50,8	150	29,3	450	35,7
180	40,9	480	51,6	180	29,9	480	36,3
210	42,5	510	52,1	210	30,7	510	36,8
240	44,1	540	52,7	240	31,4	540	37,2
270	45,3	570	53,2	270	32,2	570	37,7

Příloha 3 Průběh průměrné teploty v čase při prohřívání elektrodou č. 3							
teplejší strana				chladnější strana			
čas	teplota	čas	teplota	čas	teplota	čas	teplota
t	T _{průměrná}	t	T _{průměrná}	t	T _{průměrná}	t	T _{průměrná}
[s]	[°C]	[s]	[°C]	[s]	[°C]	[s]	[°C]
0	27,2	300	47,7	0	26,9	300	36,1
30	32	330	49,4	30	27,9	330	36,8
60	35,2	360	50,2	60	29,1	360	37,7
90	37,6	390	51,1	90	30,2	390	38,3
120	39,5	420	52	120	31,2	420	39
150	41,7	450	52,7	150	32	450	39,7
180	43,1	480	53,3	180	32,9	480	40,2
210	44,9	510	53,9	210	33,7	510	40,8
240	46,2	540	54,5	240	34,5	540	41,3
270	47,3	570	54,8	270	35,2	570	41,9

Příloha 4 Hodnoty teploty a koncentrace v čase při experimentu č. 1

čas	teplota	koncentrace CO ₂	čas	teplota	koncentrace CO ₂	čas	teplota	koncentrace CO ₂
[s]	[°C]	[ppm]	[s]	[°C]	[ppm]	[s]	[°C]	[ppm]
0	26,8	417	750	26,6	421	1500	26,1	423
30	26,5	435	780	26,1	422	1530	25,6	424
60	27,3	441	810	25,7	424	1560	26,5	434
90	28,7	443	840	25,6	444	1590	27,9	442
120	29,9	441	870	27	439	1620	29,4	440
150	31	436	900	28,8	434	1650	30,7	435
180	31,9	433	930	30,4	431	1680	31,8	434
210	32,6	431	960	31,6	429	1710	32,6	432
240	33,2	430	990	32,5	429	1740	33,3	429
270	33,7	426	1020	33,3	426	1770	33,8	427
300	34,1	425	1050	33,9	425	1800	34,3	426
330	34,4	428	1080	34,4	425	1830	34,7	425
360	34,8	424	1110	34,9	423	1860	35	426
390	35,1	424	1140	35,2	426	1890	35,4	426
420	35,3	423	1170	35,6	426	1920	35,6	425
450	35,6	423	1200	35,9	423	1950	35,9	424
480	35,8	422	1230	36,1	423	1980	35,9	422
510	36	422	1260	36	410	2010	35,2	415
540	36	411	1290	34,4	409	2040	34,3	414
570	34,7	408	1320	32,5	412	2070	32,5	417
600	32,8	410	1350	30,3	415	2100	31,1	418
630	30,9	413	1380	29,2	418	2130	29,5	422
660	29,3	417	1410	28	420	2160	27,9	423
690	28,2	419	1440	27,2	420	2190	27,2	423
720	27,3	420	1470	26,6	423			

Příloha 5 Hodnoty teploty a koncentrace v čase při experimentu č. 2

čas	teplota	koncentrace	čas	teplota	koncentrace	čas	teplota	koncentrace
[s]	[°C]	[ppm]	[s]	[°C]	[ppm]	[s]	[°C]	[ppm]
0,00	27,15	359,00	1290,00	30,97	356,00	2580,00	36,11	345,00
30,00	27,09	357,00	1320,00	30,72	354,00	2610,00	36,10	347,00
60,00	27,04	359,00	1350,00	30,47	356,00	2640,00	35,58	348,00
90,00	26,96	366,00	1380,00	30,28	354,00	2670,00	34,81	347,00
120,00	26,97	366,00	1410,00	30,08	353,00	2700,00	34,04	348,00
150,00	27,50	362,00	1440,00	29,91	354,00	2730,00	33,35	350,00
180,00	28,44	362,00	1470,00	29,73	354,00	2760,00	32,81	351,00
210,00	29,24	361,00	1500,00	29,56	355,00	2790,00	32,32	351,00
240,00	29,94	360,00	1530,00	29,38	355,00	2820,00	31,94	354,00
270,00	30,47	359,00	1560,00	29,24	354,00	2850,00	31,60	353,00
300,00	30,92	359,00	1590,00	29,09	355,00	2880,00	31,32	354,00
330,00	31,40	357,00	1620,00	28,93	354,00	2910,00	31,06	353,00
360,00	31,81	358,00	1650,00	28,81	356,00	2940,00	30,81	353,00
390,00	32,16	358,00	1680,00	28,69	355,00	2970,00	30,59	354,00
420,00	32,54	359,00	1710,00	28,57	354,00	3000,00	30,42	353,00
450,00	32,86	357,00	1740,00	28,45	356,00	3030,00	30,24	353,00
480,00	33,13	357,00	1770,00	28,35	356,00	3060,00	30,06	353,00
510,00	33,44	356,00	1800,00	28,23	356,00	3090,00	29,92	353,00
540,00	33,69	356,00	1830,00	28,13	358,00	3120,00	29,76	354,00
570,00	33,91	356,00	1860,00	28,06	366,00	3150,00	29,61	354,00
600,00	34,16	356,00	1890,00	27,94	365,00	3180,00	29,48	355,00
630,00	34,39	356,00	1920,00	28,02	362,00	3210,00	29,36	354,00
660,00	34,55	354,00	1950,00	28,73	360,00	3240,00	29,24	353,00
690,00	34,77	355,00	1980,00	29,50	358,00	3270,00	29,13	353,00
720,00	34,94	355,00	2010,00	30,28	356,00	3300,00	29,00	354,00
750,00	35,12	356,00	2040,00	30,92	355,00	3330,00	28,92	355,00
780,00	35,30	358,00	2070,00	31,46	355,00	3360,00	28,79	355,00
810,00	35,43	356,00	2100,00	31,96	355,00	3390,00	28,73	356,00
840,00	35,60	355,00	2130,00	32,43	355,00	3420,00	28,65	356,00
870,00	35,68	358,00	2160,00	32,80	353,00	3450,00	28,56	356,00
900,00	35,84	359,00	2190,00	33,19	355,00	3480,00	28,49	354,00
930,00	35,96	357,00	2220,00	33,52	355,00	3510,00	28,40	356,00
960,00	36,11	349,00	2250,00	33,85	353,00	3540,00	28,32	354,00
990,00	36,10	348,00	2280,00	34,12	353,00	3570,00	28,27	355,00
1020,00	35,59	348,00	2310,00	34,35	352,00	3600,00	28,19	354,00
1050,00	34,82	351,00	2340,00	34,62	353,00	3630,00	28,08	355,00
1080,00	34,00	351,00	2370,00	34,86	353,00	3660,00	28,03	354,00
1110,00	33,33	350,00	2400,00	35,10	352,00	3690,00	28,01	364,00
1140,00	32,78	354,00	2430,00	35,28	352,00	3720,00	27,94	361,00
1170,00	32,32	353,00	2460,00	35,46	351,00	3750,00	28,14	361,00
1200,00	31,89	353,00	2490,00	35,64	352,00	3780,00	28,85	358,00
1230,00	31,56	352,00	2520,00	35,81	353,00	3810,00	29,62	357,00

čas	teplota	koncentrace	čas	teplota	koncentrace	čas	teplota	koncentrace
[s]	[°C]	[ppm]	[s]	[°C]	[ppm]	[s]	[°C]	[ppm]
3870,00	31,12	356,00	5160,00	29,04	351,00	6450,00	32,43	348,00
3900,00	31,67	350,00	5190,00	28,92	352,00	6480,00	32,06	349,00
3930,00	32,28	354,00	5220,00	28,87	352,00	6510,00	31,67	348,00
3960,00	32,69	354,00	5250,00	28,80	352,00	6540,00	31,41	348,00
3990,00	33,13	353,00	5280,00	28,73	351,00	6570,00	31,17	348,00
4020,00	33,52	352,00	5310,00	28,66	350,00	6600,00	30,97	349,00
4050,00	33,83	352,00	5340,00	28,59	351,00	6630,00	30,75	350,00
4080,00	34,13	352,00	5370,00	28,51	351,00	6660,00	30,57	350,00
4110,00	34,46	352,00	5400,00	28,45	351,00	6690,00	30,40	351,00
4140,00	34,71	352,00	5430,00	28,38	352,00	6720,00	30,25	350,00
4170,00	34,93	350,00	5460,00	28,33	352,00	6750,00	30,14	350,00
4200,00	35,20	350,00	5490,00	28,27	351,00	6780,00	30,01	350,00
4230,00	35,40	351,00	5520,00	28,24	353,00	6810,00	29,89	351,00
4260,00	35,59	350,00	5550,00	28,15	352,00	6840,00	29,76	350,00
4290,00	35,79	350,00	5580,00	28,12	353,00	6870,00	29,67	350,00
4320,00	35,96	344,00	5610,00	28,10	353,00	6900,00	29,55	350,00
4350,00	36,12	344,00	5640,00	28,08	354,00	6930,00	29,47	350,00
4380,00	36,07	345,00	5670,00	28,03	363,00	6960,00	29,37	350,00
4410,00	35,61	347,00	5700,00	27,99	362,00	6990,00	29,30	351,00
4440,00	34,92	349,00	5730,00	28,07	357,00	7020,00	29,22	352,00
4470,00	34,49	349,00	5760,00	28,80	357,00	7050,00	29,14	351,00
4500,00	34,02	349,00	5790,00	29,74	352,00	7080,00	29,07	352,00
4530,00	33,42	350,00	5820,00	30,57	354,00	7110,00	28,99	351,00
4560,00	32,83	349,00	5850,00	31,34	354,00	7140,00	28,92	351,00
4590,00	32,35	349,00	5880,00	31,95	353,00	7170,00	28,85	351,00
4620,00	31,79	350,00	5910,00	32,56	353,00	7200,00	28,76	352,00
4650,00	31,51	350,00	5940,00	33,00	352,00	7230,00	28,73	352,00
4680,00	31,27	350,00	5970,00	33,53	352,00	7260,00	28,65	350,00
4710,00	31,01	351,00	6000,00	33,85	350,00	7290,00	28,61	352,00
4740,00	30,83	350,00	6030,00	34,27	349,00	7320,00	28,52	351,00
4770,00	30,63	350,00	6060,00	34,60	349,00	7350,00	28,50	352,00
4800,00	30,46	350,00	6090,00	34,86	352,00	7380,00	28,46	351,00
4830,00	30,30	351,00	6120,00	35,13	349,00	7410,00	28,41	352,00
4860,00	30,16	352,00	6150,00	35,41	348,00	7440,00	28,34	352,00
4890,00	30,00	352,00	6180,00	35,60	348,00	7470,00	28,30	352,00
4920,00	29,86	352,00	6210,00	35,81	343,00	7500,00	28,26	352,00
4950,00	29,76	353,00	6240,00	36,04	342,00	7530,00	28,23	352,00
4980,00	29,63	354,00	6270,00	36,14	343,00	7560,00	28,18	351,00
5010,00	29,51	353,00	6300,00	35,71	345,00	7590,00	28,14	351,00
5040,00	29,41	353,00	6330,00	34,93	348,00	7620,00	28,12	351,00
5070,00	29,32	353,00	6360,00	34,18	348,00	7650,00	28,10	351,00
5100,00	29,24	354,00	6390,00	33,48	348,00	7680,00	28,05	350,00