Testování adsorpčních materiálů pro odstranění CO_2 z bioplynu

Veronika Vrbová, Karel Ciahotný
VŠCHT v Praze, Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší

Abstrakt:

Existuje celá řada způsobů odstraňování oxidu uhličitého a nežádoucích látek z bioplynu, aby byl získán více hodnotný biomethan s obsahem nad 95 % CH_4. Jedním ze způsobů je použití různých druhů adsorpčních materiálů, které lze pro separaci využít. Během této práce bylo testováno několik druhů sorpčních materiálů pro adsorpci CO_2, nejdříve v laboratorních podmínkách a následně v reálných podmínkách s použitím bioplynu. Cílem bylo provést statické měření s čistým CO_2 a dynamické měření pro sorpci CO_2 ze směsi CO_2 – vzduch. Poté byly sorpční materiály testovány na Ústřední čistírně odpadních vod v Praze Bubenči, kde bylo postaveno zařízení pro separaci oxidu uhličitého z reálného bioplynu při tlacích 0,5 – 2,5 MPa.

Úvod

Nejdůležitějším stupněm úpravy bioplynu na biomethan je zařízení na odstranění oxidu uhličitého, který je zastoupen v bioplynu v rozmezí koncentrací 25 – 55 % obj. Mezi další látky, které je nutné z bioplynu odstranit, jsou např. vodní pára, sulfan, amoniak, organokřemičité sloučeniny a kyslík, které jsou v bioplynu obsaženy v malých množstvích. U skládkového a kalového plynu to mohou být dále také halogenové sloučeniny. Metody, které se pro čištění bioplynu na biomethan využívají, se liší použitou technologií a pracovními podmínkami v závislosti na složení vstupujícího bioplynu. Mezi tyto metody patří adsorpce na pevných adsorbentech, dále lze využít fyzikální či chemickou absorpci, kryogenní nebo membránovou separaci. Jednotlivé technologie se liší v principu separace, komplexnosti (některé odstraňují pouze určité nežádoucí složky z bioplynu) a kapacitních možností. Ve srovnání s jinými separačními metodami je nejvyužívanější adsorpce pro své nízké investiční náklady a nízké energetické potřeby. Současně tato metoda dokáže separovat z bioplynu nejen CO_2, ale také ostatní nečistoty, jako například vodu, sulfan a sloučeniny křemíku.

Teoretická část

Princip adsorpce

Adsorpce je separační proces, jehož principem je sdílení hmoty mezi kapalnou, či plynnou látkou a povrchem pevné látky účinkem mezipovrchových přitažlivých sil. Tento proces se používá k oddělování složek, které jsou v nízké koncentraci obsaženy v tekutinách (v plynech nebo kapalinách) [1].

Adsorpční technologie nalezly své uplatnění v několika technologických odvětvích, např. úprava odpadních plynů, sušení vzduchu, zakoncentrování vyrobených produktů, čistění pracovního ovzduší, znovuzískávání rozpouštědel, využití při sanačních procesech a čištění odpadních vod.

K adsorbentu jsou separované částice poutány silami různé povahy; podle toho rozlišujeme fyzikální adsorpci nebo chemisorpci [1].

Při fyzikální adsorpci dochází mezi porézním materiálem a molekulami adsorptivu k interakci vlivem tzv. Van der Waalsových sil. Při tomto procesu nedochází k přenosu elektronů, ani jejich sdílení, molekuly adsorbované látky se neštěpí, ale naopak dochází

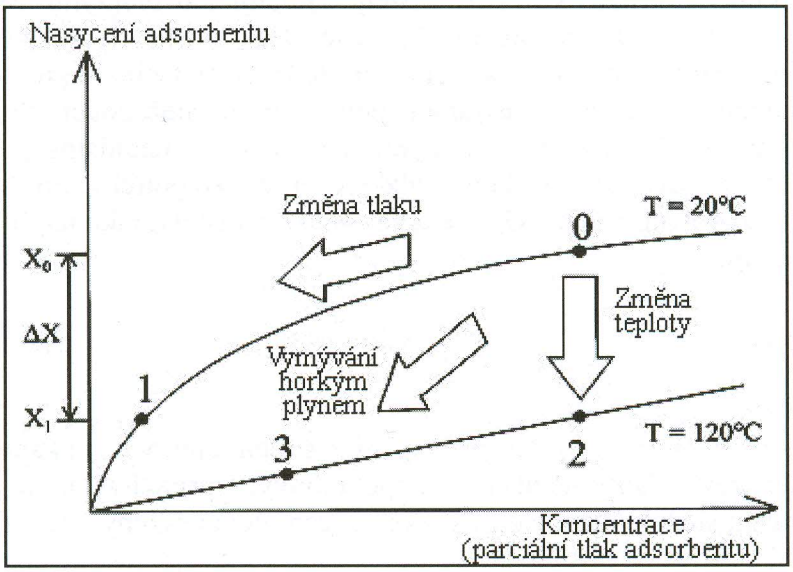
k vícevrstvé adsorpci. Tento děj je vratný, při snížení tlaku nebo zvýšení teploty dochází k uvolnění adsorbované látky, čímž dojde k regeneraci použitého sorbentu. Adsorpční teplo, které představuje energii odebranou pohybujícím se molekulám, se u fyzikální adsorpce pohybuje v rozmezí 300 - 3 000 J/mol.

Na rozdíl od fyzikální adsorpce dochází při chemisorpci k přenosu, nebo sdílení elektronů mezi adsorpčním materiálem a adsorbovanou látkou, čímž vznikají silnější vazebné síly, které jsou srovnatelné se silami vedoucích ke vzniku chemických povrchových sloučenin. Chemisorpce je děj nevratný, pro uvolnění vazeb je nutná podstatně vyšší teplota než při fyzikální adsorpci a desorbovaná látka se liší od adsorbované. Adsorpční teplo, které se uvolňuje při chemisorpci, je v mezích 40 – 400 kJ/mol [2, 3].

Hlavním kritériem pro rozlišení fyzikální adsorpce a chemisorpce je specifičnost adsorpčního procesu. Chemisorpce je specifická, naopak fyzikální adsorpce je nespecifická, protože dochází k sorpci jakéhokoli adsorptivu při vhodných podmínkách na všech površích adsorpčních materiálů. Dalším kritériem je počet adsorbovaných vrstev, zatímco chemisorpce je vždy monomolekulární, během fyzikální adsorpce dochází k vícevrstvé adsorpci [4]

Opačný proces adsorpce je desorpce, která vede ke zpětnému uvolňování naadsorbované látky do plynné, nebo kapalné fáze. Polymerizující látky, látky s vysokým bodem varu, nebo látky, které se na povrch adsorbentu naváží chemickou vazbou, nelze desorbovat běžnými způsoby. Princip desorpce je znázorněn na Obr. 1. Rozlišujeme tři základní typy desorpce:

- zvýšením teploty adsorbentu,
- snížením parciálního tlaku adsorptivu v okolním prostředí,
- proplachováním proudem inertního plynu.



Obr. 1. Principy desorpce[5].

Druhy adsorpčních materiálů

Jako adsorpční materiály se nejčastěji používají uhlíkaté adsorbenty, silikagely a zeolity. Výběr vhodného materiálu závisí na adsorpční kapacitě a selektivitě adsorbentu, požadované čistotě produktu, možnosti regenerace nasyceného adsorbentu a jeho ceně.

Mezi hlavní druhy uhlíkatých adsorbentů patří aktivní koks, aktivní uhlí a uhlíkatá molekulová síta. Všechny tyto materiály mají stejný vzhled, ale liší se svými fyzikálními vlastnostmi, např. velikostí vnitřního povrchu a svými adsorpčními schopnostmi.

Aktivní koks je adsorpční materiál s méně rozvinutým adsorpčním povrchem, řádově v desítkách až stovkách m^2 na 1 gram adsorbentu. Jako surovina pro aktivní koks se nejčastěji používá hnědé uhlí pro výrobu adsorpčního materiálu v kusové a práškové formě, nebo černé uhlí, ze kterého se vyrábí aktivní koks ve formě výlisků o průměru 3 – 5 mm a délce několika mm. Při výrobě tohoto sorpčního materiálu se neprovádí aktivace a adsorpční povrch se tvoří jen v procesu karbonizace použité suroviny. Tento sorpční materiál má vysokou mechanickou pevnost a lze ho několikanásobně využít. Jeho použití je především při odstraňování různých plynných škodlivin ze spalin a jiných odpadních plynů a při čištění odpadních vod.

Aktivní uhlí má vnitřní povrch vyšší než aktivní koks, pohybuje se zhruba od 400 m^2/g. Aktivní uhlí je vyráběno v následujících formách: práškové, kusové, extrudované a impregnované aktivní uhlí. Tento druh adsorpčního materiálu se používá k čištění plynů, např. k odstraňování zapáchajících látek, které jsou v odpadních plynech přítomny v nízkých koncentracích.

Uhlíkatá molekulová síta se označují sorbenty, které mají jednotnou velikost vstupních otvorů do porézního systému. Tento požadavek je dodržen pouze u zeolitických molekulových sít, jelikož vzhledem k jejich jednoznačnému krystalografickému uspořádání mají přesně definovanou velikost vstupních otvorů do porézního systému. U uhlíkatých molekulových sít nelze tento požadavek dodržet, vnitřní porézní systém má podobnou strukturu jako adsorpční systém aktivních uhlí. Adsorpční povrch těchto materiálů se pohybuje řádově ve stovkách m^2 na jeden gram materiálu a má vysokou pevnost. Tento sorpční materiál se běžně vyrábí ve formě válečků o průměru a délce několik mm. Výhodou uhlíkatého molekulového síta je, že trvale nesorbuje vodu a oxid uhličitý, proto se dá využít i na dělení směsí plynů, které tyto látky obsahují [6].

Silikagel je granulovaná, pórovitá forma SiO_2 vyráběná synteticky z křemičitanu sodného. Má vysokou porozitu, a vnitřní povrch kolem 800 m^2/g, což umožňuje adsorbovat vodu a další polární látky. Po nasycení vodou může být regenerován ohřátím na 150 °C. Silikagel je netoxický, nehořlavý a chemicky vysoce odolný. Dodává se ve formě tvrdých kuliček o různých velikostech, které jsou velmi odolné proti rozdrcení a opotřebení.

Zeolity nacházejí stále nové možnosti využití v ochraně životního prostředí. Mají schopnost selektivně adsorbovat molekuly plynů a par, vratně adsorbovat a desorbovat vodu a vyměňovat vlastní kationty za kationty z roztoku na základě iontové selektivity. Ve struktuře zeolitu může být zachycena pouze taková molekula, jejíž průměr je menší, než průměr kanálků. Adsorpčních vlastností zeolitů se využívá například k pohlcování nepříjemných zápachů v pracovním prostředí, protože jsou schopné dobře adsorbovat různé polární látky, jako je např. amoniak a sulfan.

Alumina je adsorpční materiál, který je tvořen z 85 % oxidem hlinitým a zbytek tvoří minerální příměsi. Specifický povrch tohoto adsorbentu je 120 – 150 m^2/g. Má vysoké hydrofilní vlastnosti, proto je vhodný pro adsorpci polárních látek. Využívá se v oblasti sušení plynů, sušení organických látek a jejich směsí nebo jako nosič katalyzátorů. Další využití je pro odstraňování kyselých plynů (např. HCl nebo HF) ze vzduchu, nebo CO_2, H_2S, CS_2 z uhlovodíků. Pro některé aplikace nachází své uplatnění díky nízkým pořizovacím nákladům.

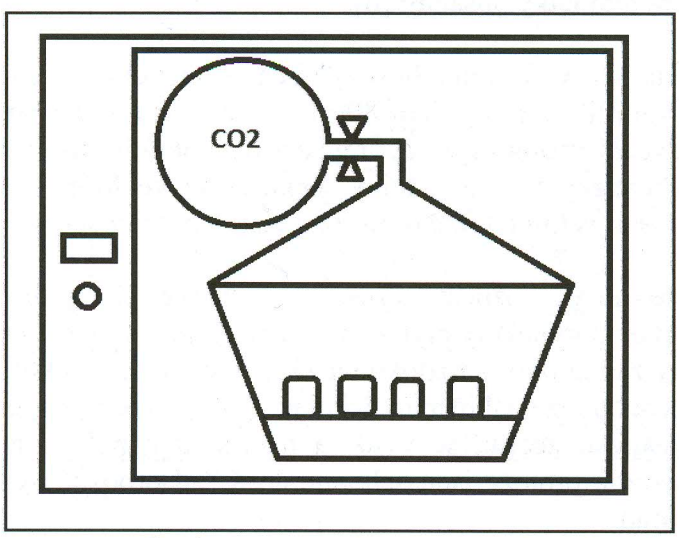
Nevýhodou využití v průmyslu je snižující se adsorpční aktivita po regeneraci tohoto materiálu [4, 7].

Experimentální část

Pro práci v laboratoři a na Ústřední čistírně odpadních vod v Praze byly vybrány následující adsorbenty na bázi aktivního uhlí, syntetických zeolitů, molekulových sít a silikagelu:

- **Calsit** – syntetický zeolit, Slovnaft
- **Tamismoleculaires** - molekulové síto, Caldic
- **Molekulové síto 13 X** - syntetický zeolit, Sigma – Aldrich
- **K 48** – aktivní uhlí, SilcarbonAktivkohle
- **C 46** – aktivní uhlí, SilcarbonAktivkohle
- **Envisorb** – kombinovaný adsorbent složený z aktivního uhlí a silikagelu, EngelhardProcessChemicalsGmbH

Nejprve byly získány informace o maximálních adsorpčních kapacitách vybraných adsorbentů. Měření probíhalo tzv. statickou gravimetrickou metodou, při které byly vzorky uloženy v termoboxu s přesně nastavenou konstantní teplotou 30 °C. Tento termobox umožňuje měření několika vzorků najednou za stejných podmínek, viz Obr. 4. Vzorky byly před měřením regenerovány v sušárně při teplotě 150 °C po dobu 4 hodin. Poté byly adsorbenty naváženy do váženek s víčkem, víčka byla odstraněna a váženky vloženy do exsikátoru. Celý exsikátor byl evakuován vodní vakuovou pumpou a následně byl na něj připojen plastový balón naplněný čistým oxidem uhličitým. Vážení adsorbentů po určité době bylo prováděno opět s příslušnými víčky a probíhalo až do dosažení konstantní hmotnosti vzorků.Schéma zařízení pro měření maximálního stupně nasycení adsorbentů v prostředí čistého CO_2 je znázorněno na Obr. 2.

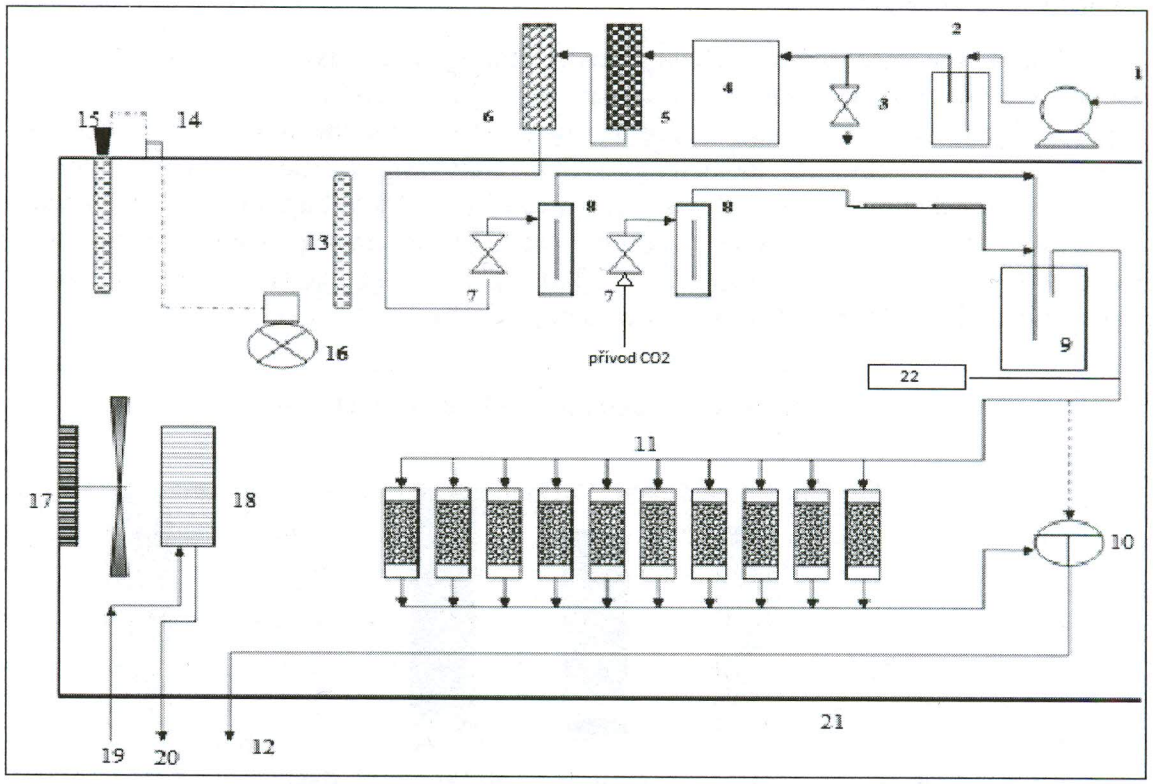


Obr. 2. Nákres temperovacího boxu pro měření maximální adsorpční kapacity testovaných adsorbentů pro CO_2.

Dále bylo provedeno měření se stejnými vzorky adsorbentů tzv. průtočnou gravimetrickou metodou. Vzorky testovaných adsorbentů jsou naplněny v adsorbérech a testovány paralelně. Celá aparatura je umístěna v uzavřeném temperovaném boxu, což umožňuje za stejných podmínek měřit až 10 testovaných adsorbentů. Schéma průtočné gravimetrické aparatury je znázorněno na Obr. 3. K měření adsorpčních izoterem byla používána směs CO_2 a inertního

plynu (vysušený vzduch), která proudila přes adsorbéry naplněné testovanými adsorpčními materiály. Adsorpční rovnováhy bylo dosaženo po ustálení konstantní hmotnosti, která byla zjišťována pravidelným vážením všech adsorbérů v určitých časových intervalech. Koncentrace a oxidu uhličitého v plynné směsi byly sledovány pomocí přístroje ASEKO (IČ senzor), který ukazoval aktuální hodnoty koncentrace CO_2 v plynné směsi před vstupem do adsorbérů s testovanými adsorpčními materiály. Po ustavení adsorpční rovnováhy ve všech adsorbérech, kdy se hmotnosti adsorbentů již nemění, pokračovalo měření stejným způsobem pro nastavenou vyšší koncentraci CO_2 v plynné směsi.

Potřebný vzduch byl čerpán membránovým čerpadlem a před měřením byl sušen ve třech stupních. V prvním stupni docházelo k vysušení vymražováním v U - trubici, která byla ponořena do směsi ethanolu s přídavkem 5 % methanolu a pevným oxidem uhličitým, tím docházelo k ochlazení až na -70 °C. Druhý stupeň sušení byla adsorpce vodní páry na silikagelu a posledním stupněm sušení bylo molekulové síto 5 Å, kde se vedle vodní páry odstranil ještě atmosférický CO_2. Smícháním tohoto proudu vzduchu s druhým proudem CO_2 z tlakové láhve v určitém poměru byla získánasměs o požadované koncentraci oxidu uhličitého, která byla vedena do adsorbérů s testovanými vzorky. Hmotnost adsorbovaného oxidu uhličitého v každém vzorku adsorbentu byla stanovena jako rozdíl hmotnosti příslušného adsorbéru se vzorkem adsorbentu před a po skončení měření.



1-membránové čerpadlo, 2–láhev na vyrovnávání pulzů, 3–regulační ventil, 4–kondenzační sušení, 5–sušení silikagelem, 6-sušení molekulovým sítem, 7–jehlový ventil, 8–kapilární průtokoměr, 9-směšovací láhev, 10–třícestný kohout, 11–adsorbéry se vzorky, 12 – odtah do digestoře, 13-kontrolní rtuťový teploměr, 14–relé, 15–teploměr Vertex, 16–infralampa, 17–ventilátor, 18–chladič, 19–vstup chladící vody, 20-výstup chladící vody, 21-termostatovaná skříň, 22-analyzátor ASEKO

Obr. 3. Schéma průtočné gravimetrické aparatury.

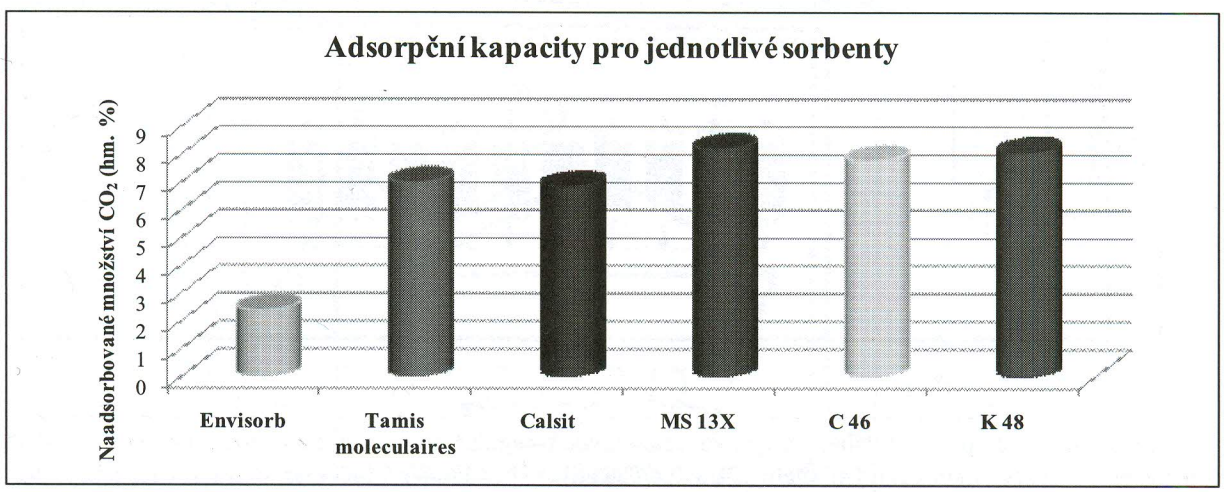
Testování vybraných adsorbentů probíhalo za zvýšeného tlaku. Pro tato měření byla používána modelová směs oxidu uhličitého a methanu o koncentraci CO_2 35 % obj. Testovací aparatura byla složena z tlakové láhve obsahující plynnou směs, regulátoru tlaku plynu, který umožňoval nastavení požadovaného tlaku plynu pro testování a z adsorbéru o délce 1000 mm

a průměru 20 mm z antikorozní oceli. Za adsorbérem byl jehlový regulační ventil umožňující expanzi tlaku plynu na tlak atmosférický a nastavení požadovaného průtoku modelového plynu, který byl při každém měřeném tlaku nastavován na cca 100 dm^3/h (při normálním tlaku). Průtok plynu byl měřen suchým membránovým plynoměrem, který byl umístěn za jehlovým regulačním ventilem. Měření probíhalo při čtyřech různých tlacích 0,2; 0,4; 0,6 a 0,8 MPa.

Další pokusy byly prováděny s reálným bioplynem na ÚČOV Praha s větším dvouplášťovým adsorbérem. Přívod surového bioplynu byl spodem adsorbéru přes vnitřní kolonu s náplní adsorpčního materiálu a přečištěný plyn se vracel podél stěn adsorbéru a byl odváděn ven přes jehlový regulační ventil. Průměr vnitřní kolony byl 80 mm a její délka 600 mm. Součástí aparatury byl třístupňový kompresor, kterým byl bioplyn stlačován na požadovaný tlak a poté vstupoval do adsorbéru. Do testovacího zařízení byl plyn odebírán z bioplynového potrubí za ohřívačem plynu. Vstupní koncentrace oxidu uhličitého byla přibližně 35 % CO_2. Pomocí jehlového ventilu byly regulovány průtoky bioplynu aparaturou a objem prošlého plynu byl opět měřen membránovým plynoměrem. Požadovaný průtok bioplynu adsorbérem byl vypočten na vyšší průměr adsorbéru na cca 1 500 dm^3/h (za atmosférického tlaku). Měření bylo provedeno při tlacích 0,5; 1; 1,5; 2 a 2,5 MPa.

Diskuze a výsledky:

Na Obr. 4 jsou znázorněny výsledky maximálního stupně nasycení adsorbentů, které byly zjištěny gravimetrickyna statické aparatuře s použitím čistého CO_2vážením adsorbentů temperovaných na 30 °C před a po jejich saturaci oxidem uhličitým. Jedná se tedy o maximálně dosažitelné ads. kapacity pro CO_2. Nejvyšší adsorpční kapacity byly zjištěny u vzorků syntetického zeolitu, molekulového síta 13 X a aktivního uhlí K 48, jejichž kapacity dosahovaly 8 % CO_2. Nejnižší sorpční kapacitu vykazoval kombinovaný adsorbent Envisorb B+, jehož sorpční kapacita byla 2 % CO_2. Shodné výsledky sorpčních kapacit byly u anorganických adsorbentů Tamis moleculaires a Calsitu.

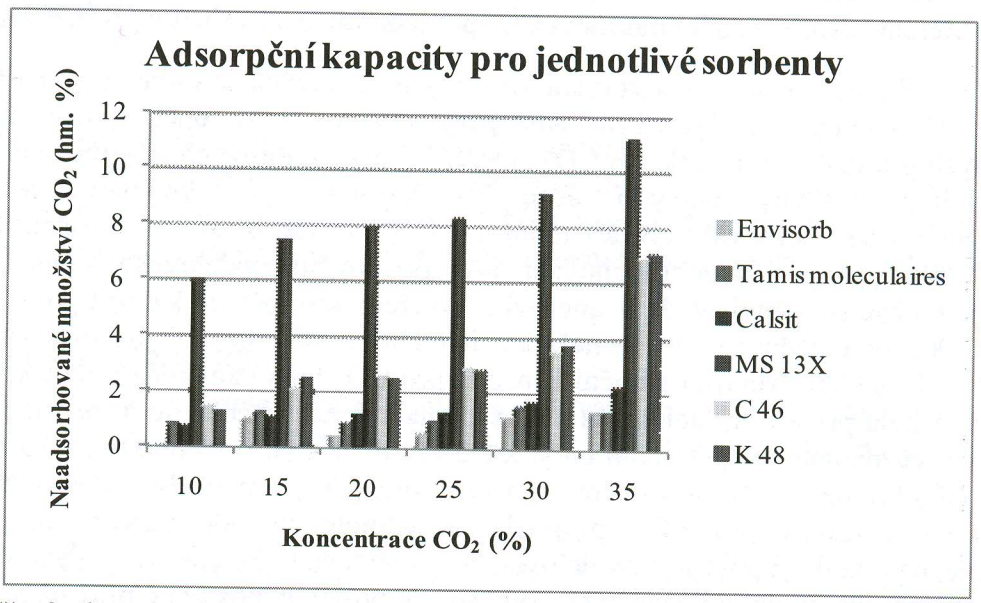


Obr. 4. Měření adsorpční kapacity pro CO_2 pro jednotlivé vzorky při použití čistého CO_2 při statickém experimentu.

Adsorpční kapacity pro CO_2 na jednotlivých vzorcích adsorbentů, které byly měřeny průtočnou metodou s použitím modelové směsi vzduch – CO_2 při teplotě 25 °C, jsou znázorněny na Obr. 5. Jedná se opět o gravimetricky zjištěné adsorpční kapacity zjištěné vážením adsorbentů před pokusem a po jejich nasycení do rovnovážného stavu. Molekulové síto 13X vykazovalo nejvyšší sorpční kapacitu při všech měřených koncentracích CO_2.

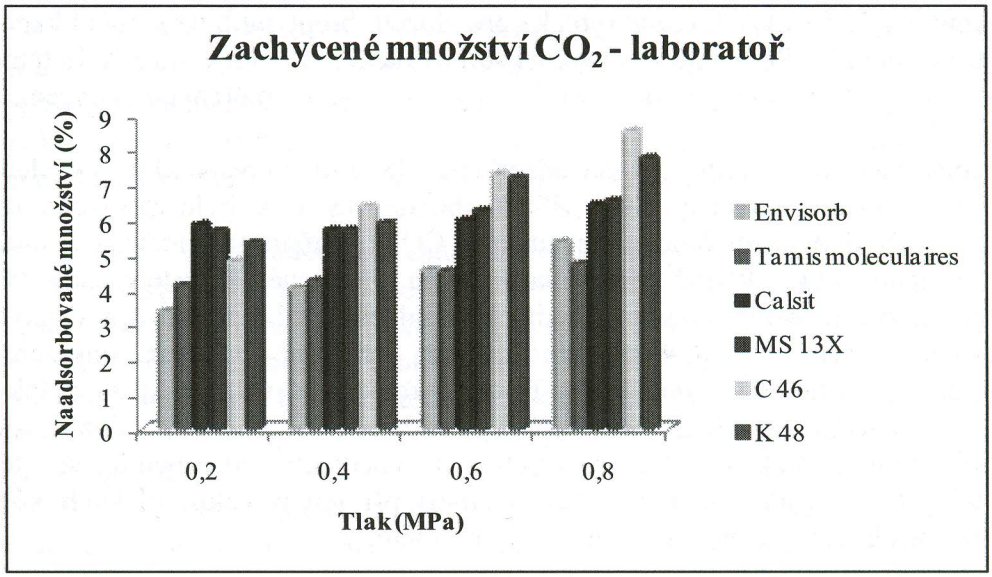
Při koncentraci 35 % CO_2, která je typická pro složení bioplynu byla sorpční kapacita tohoto sorbentu 11,2 hm. %. Při stejné koncentraci sorbovala aktivní uhlí C 46 a K 48 téměř 7 hm. % CO_2. Ostatní adsorpční materiály sorbovaly při všech měřených koncentracích CO_2 pod 2 hm. %.

Všechny získané výsledky až na adsorbent MS 13X korespondují s výsledky měření adsorpčních kapacit pro čistý CO_2. U adsorbentu MS 13X bylo dosaženo na průtočné aparatuře téměř dvojnásobné ads. kapacity pro CO_2 (zjištěno gravimetricky), než v případě použití čistého CO_2. Patrně při pokusech na průtočné aparatuře adsorboval tento adsorbent, který má velmi vysokou afinitu k vodní páře, také zbytkovou vlhkost vzduchu, která v něm zbyla po třístupňovém čištění, případně vlhkost obsaženou v láhvi s CO_2, který byl k měřením používán. Tato vlhkost byla velmi nízká, avšak adsorbent MS 13 X jako jediný ze všech testovaných adsorbentů sorbuje velmi dobře vodu z plynu i při jejich velmi nízkých koncentracích. U ostatních adsorbentů se tento efekt neprojevil, protože vodní páru z plynných směsí při jejich velmi nízkých koncentracích buď vůbec neadsorbují, nebo adsorbují jen velmi málo.



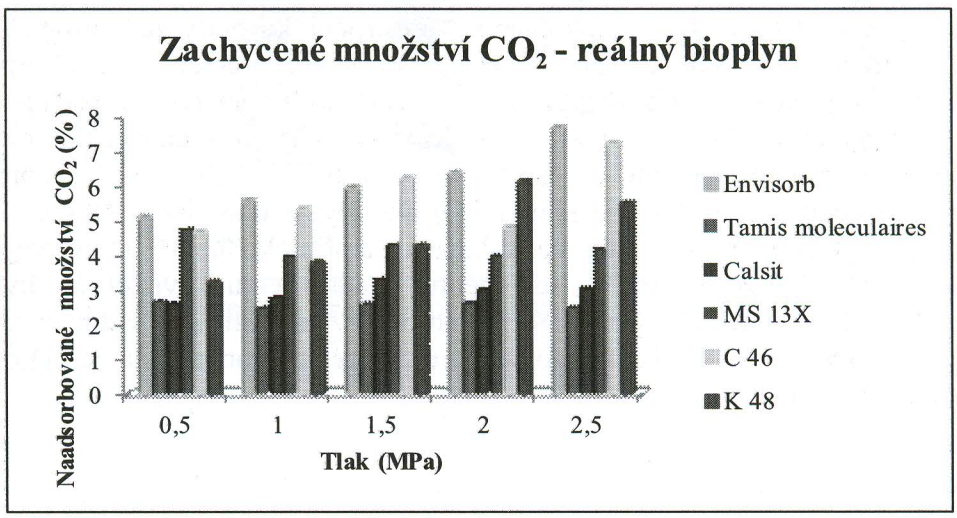
Obr. 5. Měření adsorpční kapacity pro jednotlivé adsorbenty pro různé koncentrace CO_2 při dynamickém experimentu.

Za laboratorní teploty byly dále měřeny adsorpční kapacity jednotlivých adsorbentů pro CO_2 z modelové směsi plynu (CO_2 + CH_4) při zvýšených tlacích. Tyto adsorpční kapacity nebyly zjišťovány vážením adsorbentů, nýbrž výpočtem z naměřených průnikových křivek pro CO_2 (integrací příslušné průnikové křivky a vztažením zachyceného množství CO_2 na jednotkovou hmotnost použitého adsorbentu). Získané výsledky jsou znázorněny v grafu na Obr. 6. Jako nejvhodnější se pro záchyt CO_2 ukázaly aktivní uhlí K 48 a C 46, u kterých se se zvyšujícím tlakem zvyšuje i adsorpční kapacita a při tlaku 0,8 MPa byla sorpční kapacita sorbentu C 46 téměř 9 % CO_2 na 1 g adsorbentu. U adsorbentu Envisorb B+ byla adsorpční kapacita při nízkých tlacích nejnižší. Stejné sorpční vlastnosti jsou viditelné u adsorbentů Calsit, molekulové síto 13X a Tamis moleculaires, které adsorbovaly stejné množství CO_2 při všech měřených tlacích.



Obr. 6. Měření adsorbovaného množství CO_2 pro jednotlivé adsorbenty při různých tlacích.

Na Obr. 7 jsouznázorněny adsorpční kapacity jednotlivých adsorbentů pro CO_2 zjištěné při použití reálného bioplynu.Tyto adsorpční kapacity byly opět zjišťovány integrací příslušných průnikových křivek pro CO_2 změřených na jednotlivých adsorbentech. Při tomto měření byly zjištěny nejvyšší adsorpční kapacity pro kombinovaný adsorbent Envisorb B+, který sorboval nejvyšší množství CO_2 při všech tlacích. Naopak aktivní uhlí C 46 a K 48 vykazovalapodobné chování, jako při použití modelového plynu v laboratoři. Z toho je možné se domnívat, že nedochází při měření adsorpčních kapacit pro CO_2 u těchto sorbentů k sorpci žádných jiných nežádoucích látek. Adsorbent C 46 sorboval při tlaku 2,5 MPa 7,2 % CO_2. Nejnižší sorpční kapacita pro CO_2 byla naměřena u molekulového síta 13X, která byla při všech tlacích cca 4 % CO_2 na 1 g adsorbentu. Je to patrně způsobenou současnou významnou sorpcí vodní páry, která zabírá část adsorpčního prostoru pro možnou sorpci CO_2.Protože byly adsorpční kapacity pro CO_2 při těchto pokusech počítány z průnikových křivek pro CO_2, projevila se v tomto případě koadsorpce vodní páry negativně, na rozdíl od pokusů s modelovou směsí vzduch/CO_2, kde byly adsorpční kapacity zjišťovány gravimetricky a koadsorpce vody se zde projevila positivně přírůstkem celkového množství sorbovaných látek. Syntetický zeolit Calsit a molekulové síto Tamis moleculaires vykazovaly shodné sorpční vlastnosti a jejich sorpční kapacita byla cca 3 % CO_2.



Obr. 7. Měření adsorbovaného množství CO_2 pro jednotlivé adsorbenty při různých tlacích s použitím reálného bioplynu.

Významný nárůst adsorpční kapacity pro CO_2 u adsorbentu Envisorb při použití reálného bioplynu ve srovnání s modelovými směsmi plynů byl patrně opět způsoben současnou sorpcí vodní páry z plynu. Adsorbent Envisorb je kombinovaný sorbent skládající se ze silikagelu (cca 90 %) a aktivního uhlí. Sorpce vody na hydrofilním silikagelu patrně způsobila změnu jeho struktury (přechod do podoby gelu) a zpřístupnění dalších součástí adsorbentu pro sorpci CO_2.

Závěr

Ze získaných výsledků vyplývá, že jako nejvhodnější adsorbent pro separaci oxidu uhličitého z modelové směsi plynu za laboratorních podmínek se ukázala aktivní uhlí C 46 a K 48, jejichž adsorpční kapacita při měření čistého CO_2 dosahovala cca 7,5 hm. % CO_2 na 1 g adsorbentu. U adsorbentu C 46 nedocházelo k žádným výrazným změnám ani při separaci CO_2 z reálného bioplynu, sorpční kapacita byla téměř stejná 7,2 hm. % CO_2 na 1 g adsorbentu.

Poděkování:

Řešení této problematiky bylo realizováno za finanční podpory vyčleněné z prostředků TAČR v rámci řešení projektu TA03020421 „Technologická jednotka pro omezenou lokální výrobu biometanu nahrazujícího fosilní paliva především v dopravě a zemědělství". Dále autoři příspěvku děkují vedení ÚČOV Praha za umožnění měření s reálným bioplynem.

Seznam použité literatury:

1. Míka V.; Neužil L.: Chemické inženýrství II., Vydavatelství VŠCHT, Praha, 1993
2. Ponec V., Knor Z., Černý S.: Adsorpce na tuhých látkách, SNTL, Praha, 1968
3. Moore W.: Fyzikální chemie, SNTL, 1979
4. Barthen D., Breitbach M.: Adsorptionstechnik, Springer, 2001
5. Bureš M., Černý Č., Chuchvalec P.: Fyzikální chemie II, skripta VŠCHT, Praha, 1994
6. Ciahotný K.: Vlastnosti, výroba a použití uhlíkatých adsorbentů, skripta VŠCHT Praha, 2005
7. Procházková A.: Adsorpční sušení a čištění zemního plynu pro pohon motorových vozidel, Diplomová práce, VŠCHT, Praha, 2007

Ing. Veronika Vrbová, tel.: +420 220 444 230, E-mail: Veronika.Vrbova@vscht.cz
Doc. Ing. Karel Ciahotný, CSc., tel.: +420 220 444 228, E-mail: Karel.Ciahotny@vscht.cz
Vysoká škola chemicko-technologická v Praze
Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší
Technická 5, Praha 6, 166 28