

## STANOVENÍ CO<sub>2</sub> EMITOVANÉHO ANTROPOGENNÍMI A BIOGENNÍMI PROCESY DO VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ

*Barbora Miklová, František Skácel*

*Ústav plynných a pevných paliv a ochrany ovzduší, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6, miklovab@vscht.cz*

*Oxid uhličitý je produkován jak přírodními procesy, tak řadou antropogenních činností. Díky nim je uvolňován do venkovního i vnitřního ovzduší, kde ve vyšších koncentracích tvoří nežádoucí složku. Kvalita vnitřního ovzduší byla vždy lehce opomíjeným problémem. Nicméně v posledních letech dochází k nárůstu zájmu o tuto problematiku, neboť se stále více u osob objevují příznaky jako bolesti hlavy, podráždění očí, krku atd. Tyto symptomy se zařazují do tzv. Sick Building Syndrom a zmizí po opuštění budovy. Vnitřní ovzduší obsahuje různé znečišťující látky, které se podílejí na výše zmíněných příznacích. Látkou určující kvalitu vnitřního ovzduší je oxid uhličitý. Příspěvek se zaměřuje na zdůraznění problémů plynoucích z nekvalitního ovzduší a přináší doporučení, jak jim předcházet. Dále uvádí analytické metody, kterými lze stanovit koncentraci CO<sub>2</sub> ve vnitřním i vnějším ovzduší a z toho vyvodit dopady na lidské zdraví.*

*Klíčová slova: oxid uhličitý, vnitřní ovzduší, analytické metody*

Došlo 16. 11. 2017, přijato 8. 6. 2018

### 1. Úvod

V posledních desetiletích došlo k řadě změn ve stavebnictví, které se dotkly především materiálů a spotřebního zboží. Tyto změny sice přispěly ke zlepšení energetické účinnosti domů, současně však jsou tyto nové domy vzduchotěsnější než ty staré. Pokrok ve stavebnictví vedl k nižším provozním nákladům budov. Na druhou stranu snadněji vytváří prostředí, ve kterém se hromadí některé kontaminující látky. Tyto látky se uvolňují především ze stavebního materiálu a z antropogenního působení. Osoby vystavené znečišťujícím látkám (ZL) pocházejícím z výše zmíněných oblastí častěji trpí bolestmi hlavy, podrážděním očí a krku, vyrážkami, alergiemi atd. Tyto příznaky jsou kolektivně nazývány Sick Building Syndrome (SBS) neboli syndrom nezdravých budov. SBS je stále častěji se vyskytující problém, který svými příznaky může omezit pobyt v budovách. Toto omezení může vyústit až k neobyvatelnosti celé budovy. Trvalé následky způsobené dopady SBS na lidské zdraví jsou vzácné, ale příznaky tímto syndromem způsobené jsou velmi nepříjemné. Proto je důležité měřit kvalitu vnitřního ovzduší a na základě toho provést určité změny vedoucí ke zlepšení ventilace budov, respektive snížení kontaminujících látek [1, 2, 3, 4].

Vnitřní ovzduší je charakterizováno různými znečišťujícími plynnými látkami a pevnými částicemi. Oxid uhličitý má oproti ostatním ZL výhodu ve skutečnosti, že jej lze snadno detekovat a stanovit, navíc je to dobrý indikátor kvality vnitřního ovzduší. Koncentrace CO<sub>2</sub> je vhodný ukazatel, zda je ventilace v budovách dostatečná a vnitřní prostory splňují požadavky na zdravé a produktivní prostředí [5].

Kvalita vnitřního ovzduší je problém, kterému se dosud nevěnuje dostatečná pozornost. V tomto prostředí dochází k rychlejšímu nárůstu koncentrace CO<sub>2</sub>, která má okamžitý dopad na lidské zdraví. Oxid uhličitý

sice není škodlivý pro lidské zdraví v nízkých koncentracích, tak jako oxid uhelnatý, který je nebezpečný v limitu 25 – 50 ml·m<sup>-3</sup>. Je ale ukazatelem kvality vnitřního ovzduší a zajištění hygienických podmínek [6].

Oxid uhličitý je bezbarvý plyn bez zápachu, dobře rozpustný ve vodě a za standardních podmínek je chemicky stabilní. Přirozeně se vyskytuje v atmosféře, kde vzniká složitými biologickými procesy a účastní se procesu fotosyntézy. NASA na svých webových stránkách uvádí, že objemový zlomek CO<sub>2</sub> se za posledních 400 000 let pohyboval v rozmezí 180 až 300 ml·m<sup>-3</sup> a zhruba od roku 1950 začal růst. V roce 2013 dosahoval hodnoty 400 ml·m<sup>-3</sup>, což bylo poprvé v historii měření. Toto soustavné sledování koncentrace CO<sub>2</sub> ve venkovním ovzduší započalo v roce 1956 na observatoři Manua Loa na Havaji a stalo se velmi rozsáhlým. V dnešní době se jedná o 181 měřicích míst v 46 zemích. Velké množství měřicích míst je dáno tím, že se CO<sub>2</sub> považuje za hlavního přispěvatele k antropogennímu skleníkovému efektu. Přirozený skleníkový efekt zajišťuje pro život přijatelnou teplotu (15 °C) na Zemi. Naopak nepřirozený neboli antropogenní skleníkový efekt v závislosti na stále se zvyšující koncentraci skleníkových plynů vede k nadměrnému ohřívání planety Země, známému jako globální oteplování [7, 8, 9].

Kromě venkovního ovzduší je hlavním zdrojem CO<sub>2</sub> ve vnitřním ovzduší plicní ventilace osob a některé mikrobiální procesy. Produkce oxidu uhličitého ve vnitřním ovzduší plicní ventilací osob se odvíjí od fyzické aktivity a proporcí člověka. Na základě těchto faktorů bylo stanoveno rozmezí vyprodukovaného objemu CO<sub>2</sub> za hodinu na osobu, které je od 2 do 26 l. Nejnižší hranice je pro malé spící dítě a nejvyšší je naopak pro dospělou osobu vykonávající vysoký stupeň fyzické aktivity. Zatímco koncentrace CO<sub>2</sub> ve venkovním ovzduší se pohybuje kolem 400 ml·m<sup>-3</sup>, přípustný limit pro vnitřní ovzduší je 1 000 ml·m<sup>-3</sup> s maximální hodnotou

1 500 ml·m<sup>-3</sup>, který je velmi rychle a často překročen. Limitní koncentrace 1 500 ml·m<sup>-3</sup> byla ustanovena ve vyhlášce č. 268/2009 Sb., v platném znění. Udává se, že při překročení koncentrace 1 000 ml·m<sup>-3</sup> se člověk cítí unavený, ospalý a nesoustředěný. Při překročení limitu 1 500 ml·m<sup>-3</sup> se prohlubují příznaky únavy, snižuje se výkonnost a schopnost se soustředit a další již zmiňované symptomy. Takovýto vzduch se považuje za nevhodný a prostředí za vydýchané [10].

Koncentrace znečišťujících látek ve vnitřním ovzduší závisí na vztahu mezi objemem vzduchu obsaženým v místnosti, venkovním znečištěním, rychlosti tvorby ZL a rychlosti odstraňování ze vzduchu. Určení aktuální expozice na osobu je těžké stanovit, protože chování a činnosti jednotlivců mohou do značné míry ovlivnit její úroveň [11, 12].

Zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví, ukládá povinnost provozovatelům zařízení pro výchovu a vzdělávání, vysokých škol, škol v přírodě, staveb pro zotavovací akce, staveb zdravotnických zařízení, zařízení sociálních služeb, ubytovacích zařízení, staveb pro obchod a pro shromažďování většího počtu osob zajistit vnitřní prostředí pobytových místností v těchto stavbách tak, aby odpovídalo hygienickým limitům chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů, upravených prováděcími právními předpisy. Vyhláška č. 410/2005 Sb., určuje množství přiváděného vzduchu do těchto prostor, viz tab. 1.

**Tab. 1** Množství přiváděného čerstvého vzduchu podle typu místnosti.

**Tab. 1** Fresh air intake volume according to the room type

Typ prostoru	Množství vzduchu (m <sup>3</sup> ·hod <sup>-1</sup> )
Učebny	20 – 30 na 1 žáka
Tělocvičny	20 – 90 na 1 žáka*
Šatny	20 na 1 žáka
Umývárny	30 na 1 umyvadlo
Sprchy	150 – 200 na 1 sprchu
Záchody	50 na 1 kabinu, 25 na 1 pisoár

\*s ohledem na konkrétní využití a kapacitu tělocvičny.

Na základě provedené literární rešerše bylo zjištěno, že k pravidelnému překročení limitů CO<sub>2</sub> nedochází jen v českých budovách, ale je to problém prakticky celosvětový. Jak ve své studii uvádí Godwin, C.; Batterman, S. [13], při měření kvality vnitřního ovzduší v 64 různých školách v Michiganu bylo zjištěno, že 17 % tříd překračuje průměrnou hodnotu CO<sub>2</sub> (1 000 ml·m<sup>-3</sup>). Ve zbylých třídách byly hodnoty CO<sub>2</sub> v limitu, a to díky instalaci klimatizačních jednotek, které se starají o celkovou kvalitu vnitřního ovzduší, aby splňovalo požadavky americké normy [14]. Pro stanovení CO<sub>2</sub>, vlhkosti a teploty byl použit přístroj Hobo HO-8 (Onset Computer Corporation, Bourne, MA, USA), se senzorem na CO<sub>2</sub> typu GMW-20 (Vaisala Corporation, Helsinky, Finsko) a se záznamem dat každých 5 minut. Současně s vnitřním ovzduším se sledovala i kvalita vnějšího prostředí [13]. Další studie

přinášející výsledky ze vzorkování vnitřního ovzduší ve školce v Portugalsku opět dokazuje, že dochází k pravidelnému překračování limitů pro CO<sub>2</sub> ve vnitřním ovzduší. K měření těchto emisí sloužil analyzátor model TG 502 (GrayWolf Sensing Solutions, Shelton, USA) se záznamem dat v délce 20 – 30 min (dopoledne i odpoledne) s intervalem 15 s. Po 7 týdenním měření byly získány koncentrace CO<sub>2</sub> v rozmezí od 796 do 3605 mg·m<sup>-3</sup>, průměrná hodnota z celého měření byla stanovena na 1 252 mg·m<sup>-3</sup>. Během sledovaného období byly zaznamenávány informace o kvalitě okolního venkovního prostředí [15]. Studie od E. Asadi et al. prezentuje výsledky stanovení vnitřního ovzduší pro hotelový komplex. Kromě ostatních indikátorů kvality vnitřního ovzduší byla stanovena i koncentrace oxidu uhličitého a to pomocí NDIR analyzátoru model PS 32 (výrobce: Sensitron), s mezí detekce 0 – 5 000 ml·m<sup>-3</sup> a mezí stanovitelnosti ±10 ±3 % z naměřených hodnot [16]. Tento analyzátor se již nevyrábí, ale je nahrazen modelem PS 33 se stejným rozsahem měření a výdrží baterie až 2 měsíce bez nabíjení [17]. Dále byl pro měření CO<sub>2</sub> a dalších chemických ukazatelů použit přístroj DirectSense IAQ (model IQ 610, výrobce: Graywolf) s mezí detekce 0 - 10 000 ml·m<sup>-3</sup> [18]. Měření probíhalo vždy 15 min v každém vybraném bodě po celou dobu měření, které bylo rozděleno na období léta a zimy. I v tomto případě bylo měřeno složení venkovního ovzduší. Pokud se v hotelových prostorách nenacházeli lidé, koncentrace CO<sub>2</sub> byla jen o něco málo vyšší, než je průměrná koncentrace CO<sub>2</sub> ve venkovním ovzduší. Ovšem ve večerních, nočních a ranních hodinách docházelo k překračování stanoveného limitu 1 000 ml·m<sup>-3</sup> i 1 500 ml·m<sup>-3</sup> [16]. Poslední příkladová studie se týká školních zařízení na území České republiky. Pro danou studii bylo vybráno 17 různých mateřských, základních, středních i vysokých škol a v každé z těchto budov byly vybrány 4 učebny, v nichž byla měřena kvalita vnitřního ovzduší. V okolí každého objektu byla vždy měřena kvalita vnějšího prostředí. Až na pět učeben byla průměrná hodnota CO<sub>2</sub> vyšší než 1 000 ml·m<sup>-3</sup> a zhruba v polovině učeben došlo k výraznému překročení limitu 1 500 ml·m<sup>-3</sup> [19]. Nejsnazší cesta jak předcházet nadlimitním koncentracím CO<sub>2</sub> ve vnitřních prostorách je jejich větrání, tento proces je doporučován i poslední zmiňovanou studií od R. Šubrta a kol. [19]. Při tomto procesu nastává několik technologických omezení. Zaprvé je to nutnost spoléhat na pověřenou osobu, která musí dohlížet na správné otevírání oken. Další problém je zajisté v tom, že pověřená osoba nerozpozná aktuální koncentraci CO<sub>2</sub> v ovzduší bez řádného vybavení. Takovýmto vybavením se myslí analyzátor se senzory na CO<sub>2</sub>, které upozorní na zvýšenou koncentraci CO<sub>2</sub>, aniž by narušily pracovní prostředí. Řešení jak udržet pravidelné větrání místností se nabízí několik, ovšem to nejschůdnější a nejméně náročné z pohledu obsluhy je rekuperační jednotka s čidlem na CO<sub>2</sub>. Účelem senzoru zaznamenávající kontinuálně koncentraci oxidu uhličitého je při překročení koncentrace dát příkaz k větrání. Rekuperační jednotka snižuje náklady na spotřebu ener-

gie na vytápění, ale na druhou stranu přináší mírné zvýšení spotřeby elektřiny na pohon ventilátoru. Při provozování rekuperační jednotky provozovatel nesmí zapomínat na pravidelnou údržbu a výměnu filtrů [19]. Před pořízením rekuperační jednotky či jiného ventilačního zařízení je doporučeno si nechat změřit koncentraci oxidu uhličitého a dalších indikátorů kvality ovzduší ve vnitřních prostorách budovy a na základě výsledků vyvodit nejlepší způsob větrání.

Ke zlepšení kvality vnitřního ovzduší se nejčastěji používá tři způsobů: řízení zdrojů znečištění, větrání a čištění vzduchu. Prevence působení zdrojů znečištění je jednou z nejlepších cest k dosažení nižšího znečištění vnitřního ovzduší. I přes snahu omezit materiály a zařízení, které uvolňují plynné ZL, se v mnoha budovách stále používají. Základním prostředkem k zajištění kvalitního vnitřního ovzduší je větrání - přirozené a nucené. Přirozené větrání je proces samovolné cirkulace vzduchu pomocí otevřeného okna, který je silně závislý na lidském faktoru. Samotný systém otevíratelných oken ještě nezajišťuje, že bude dosaženo požadované kvality vnitřního ovzduší. Z tohoto důvodu je pro použití pouze přirozeného větrání vhodné instalovat čidla na koncentraci CO<sub>2</sub>, která osoby upozorní na zhoršující se kvalitu ovzduší. Druhý způsob větrání je nucené proudění vzduchu vyvolané mechanickým působením (ventilátory, ejektory). Při použití nuceného větrání poskytuje vnitřní ovzduší výrazně lepší kvalitu než v případě přirozené ventilace. Nucené větrání s sebou přináší i několik negativ, jako jsou vyšší finanční náklady, prostor pro umístění vzduchotechnického zařízení, udržení nízké hladiny hluku, údržba a servis. Obě techniky větrání mohou být neúčinné z hlediska expozice radonu, který nemusí být větráním dostatečně odstraněn [20, 10].

Nový rozvíjející se obor, který se věnuje kvalitě vnitřního ovzduší a jejímu řízení, je znám pod pojmem „ambient assisted living“ (AAL). AAL je soubor technologií, který se zaměřuje na zlepšení kvality života starší populace. Starší lidé tráví více jak 90 % času v uzavřeném prostoru, proto je kvalita vnitřního ovzduší důležitá a měla by být řízena tak, aby bylo dosaženo pohodlí a spokojenosti obyvatel. AAL je obor, který je schopný prostřednictvím sítě senzorů a vestavěných zařízení monitorovat a poskytnout asistenci lidem v jejich obydli. Kvalita vnitřního ovzduší je kontrolována systémem, který umožňuje, např. správci budovy, v reálném čase sledovat různé parametry jako je teplota vzduchu, relativní vlhkost, koncentrace oxidu uhelnatého nebo oxidu uhličitého. Výhodou tohoto systému je, že mohou být přidány další senzory pro ostatní polutanty [21].

Cílem tohoto příspěvku je zvýšit povědomí o kvalitě především vnitřního ovzduší, které je velmi důležitou součástí každodenního života a poskytnout soubor ucelených metod pro jeho stanovení.

## 2. Metody stanovení CO<sub>2</sub>

Volba metody stanovení koncentrace oxidu uhličitého by měla vycházet z cíle jeho detekce. Metody se roz-

dělují na dva základní směry: diskontinuální a kontinuální. Diskontinuálních metod se využívá v nahodilých případech měření koncentrace CO<sub>2</sub> zpravidla za použití detekčních trubic. Naopak pro kontinuální neboli online metody stanovení koncentrace CO<sub>2</sub> vychází z použití analyzátorů na spektrofotometrickém nebo elektrochemickém principu. Analyzátoři se dají rozdělit na základě několika faktorů, podle:

- charakteru (stacionární/přenosné),
- způsobu měření (měření okamžité koncentrace/kontinuální),
- typu měření (chemické/fyzikální) [7].

### 2.1. Diskontinuální metody

Standardní postup diskontinuální metody stanovení oxidu uhličitého je využití detekčních trubic. Tyto trubice byly vyvinuty na počátku 20. století na Harvardské univerzitě pro stanovení oxidu uhelnatého. Během měření se sledovaly barevné změny pevného sorbentu, které souvisely s koncentrací analytu. Dříve se detekční trubice používaly především ve stísněných prostorech, jako byl důlní průmysl, pro hlavní toxické plyny (CO a H<sub>2</sub>S). V 70. letech, kdy se objevily první předpisy o bezpečnosti práce a ochraně zdraví, došlo k rozšíření detekčních trubic z anorganických látek i na organické látky, které jsou mnohdy více zdravotně závadné [22].

V počátcích bylo měření detekčními trubicemi ovlivněno několika podstatnými faktory, které měly vliv na jejich přesnost. Jedním z nejdůležitějších nedostatků byla absence kalibrace. Některé trubice byly po expozici porovnávány se vzorovým grafem a určení koncentrace analytu záleželo na interpretaci uživatele. Jiné trubice měly externí stupnici, která se zasouvala dovnitř a špatnou pozicí stupnice mohla být způsobena chyba. U současně vyráběných trubic jsou k dispozici kalibrační funkce ke každé výrobní šarži. Další základní nedostatek byl v určení objemu vzorku vzduchu, protože dřívější pumpy byly na principu pipetovacích balónek. Později k těmto pumpám byly přidány pomocné prvky, které zajistily jednotnou kompresi a tím přesný objem vzorku. V současné době se dává přednost pístovým čerpadlům. Postupně došlo k rozdělení moderních detekčních systémů do dvou skupin. První skupinu tvoří systémy vybavené vlnovcovými čerpadly s nižším průtokovým odporem v trubicích. Druhou skupinu tvoří systémy využívající pístová čerpadla, která mají větší odpor v trubicích [22].

Odběr vzorkovaného vzduchu se často provádí pomocí ručních pístových pump. Čerpají fixní objem, který může být buď 10 ml, nebo 50 ml. Na vstupu je umístěn filtr. Ten má za úkol bránit vstupu nečistot, jako je prach nebo skleněné částičky [22].

Detekční trubice jsou z obou stran vzduchotěsně uzavřené s vyznačenou koncentrační stupnicí a šípkou ukazující směr proudění vzorkovaného plynu. Na jedné straně je uveden celkový objem vzorku, jednotky měření, typ plynu a sériové číslo, jak je uvedeno na obr. 1. Použití detekčních trubic je jednorázové. Obecně jsou plynové detekční trubice velmi selektivní, ale některé složky vzorkovaného ovzduší mohou působit rušivě.



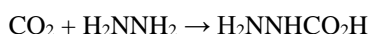
**Obr. 1** Detekční trubice pro CO<sub>2</sub> [24]

**Fig. 1** Detection tubes for CO<sub>2</sub> [24].

Proto jsou jednotlivé detekční trubice opatřeny zesílením interferujících látek [22, 23]. Použití detekčních trubic oproti jiným metodám má několik výhod. Tato metoda nevyžaduje žádný chemický analyzátor, reagenty apod., navíc není potřeba žádná speciální úprava zařízení. Jsou vhodné pro použití na pracovištích, protože jsou malé, lehké a stačí jen malý objem vzorku. Provozní postupy jsou jednoduché a mohou být provedeny každým bez speciálních potřeb a znalostí vzorkovací techniky. Výsledky měření jsou dostupné do několika minut, takže v případě potřeby lze podniknout rychlé kroky k nápravě. Vzhledem k tomu, že není potřeba žádný zdroj elektrické energie, mohou být detekční trubice použity v přítomnosti hořlavých plynů. Detekční trubice jsou dostupné v různých typech pro stanovení rozdílných plynů s pracovním rozsahem vyjádřeným objemovým zlomkem od 10<sup>-7</sup> až nad 0,1, což tento systém činí velmi flexibilní pro vzorkování v různých situacích [25].

Detekční trubice pro stanovení CO<sub>2</sub> se rozdělují podle objemu vzorkovacího vzduchu a pracovního rozsahu. Objem vzorku je obvykle 50 ml nebo 100 ml a pracovní rozsah vyjádřený objemovým zlomkem je od 0,03 % do 20 %. Pracovní teplota od 0 °C do 40 °C. Dělení je do pěti skupin podle standardního pracovního rozsahu: 0,03 – 0,5 %, 0,05 – 1 %, 0,25 – 3 %, 0,5 – 10 %, 2,5 – 20 % s relativní směrodatnou odchylkou ≤ ± 10 % [22].

Reakce, ke které dochází při záchytu oxidu uhličitého v detekční trubici lze vyjádřit následující rovnicí:



Rušivé látky, které mohou způsobovat chyby v měření, jsou buď kyselé plyny, nebo v některých případech i amoniak. Nevýhoda detekčních trubic je nemožnost opakování analýzy po regeneraci sorbentu [22, 25].

## 2.2. Kontinuální metody

Nejrozšířenější metoda stanovení oxidu uhličitého ve vnitřním ovzduší kontinuální metodou je molekulová absorpční spektrometrie v infračervené oblasti. Infračervené (IČ) záření je absorbováno molekulami analytu, u nichž dojde ke změně rotačně vibračních stavů molekul, které se promítnou do zaznamenaného absorpčního spektra vzorku. IČ spektrometrií lze analyzovat plyny, kapaliny i pevné látky [26].

IČ absorpční spektrometrie plynných soustav se člení na metody: nedisperzní infračervenou spektrometrii a infračervenou spektrometrii s Fourierovou transformací. Ramanova spektroskopie je pro využití stanovení

koncentrace CO<sub>2</sub> ve vnitřním ovzduší ještě v počátcích [27, 28].

Molekula oxidu uhličitého je lineární a v klidovém stavu má nulový dipólový moment. Absorpcí IČ záření dochází k deformacím a asymetrickým vazebným vibracím atomů, které způsobí změnu dipólového momentu. Tato změna umožní stanovení CO<sub>2</sub> v oblasti infračerveného záření [29].

IČ analyzátor měří koncentrace sledovaných složek na principu srovnávací metody. Základní části IČ analyzátoru je zdroj záření, kyvety (měrná a srovnávací) a detektor záření. Jako zdroj záření se používá buď elektricky vytápěných materiálů jako jsou Nernstovy tyčinky a globar nebo kovových topných spirál, které vyzařují polychromatické záření. Intenzita zářiče je řízena maximální teplotou zdroje záření, která se pohybuje v rozmezí 800 – 1 600 °C. Tento rozsah by měl být schopen pokrýt všechny typy vibrací stanovených molekul. V současné době se výrazně rozšiřuje použití laserových zdrojů IČ záření. Detektor záření je zařízení, které slouží pro kvantitativní záznam velikosti toku dopadajícího IČ záření, který převádí na elektrický signál. Detektory se dají v zásadě rozdělit do tří kategorií:

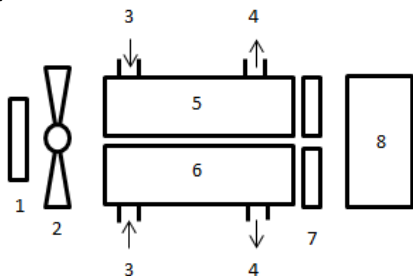
- termické detektory,
- pyroelektrické detektory,
- fotoelektrické polovodičové detektory [30].

Termický detektor spočívá ve sledování změny teploty termického článku. Termočlánky se sestávají z dvojice různých kovů (např. bismut a antimon), jejichž potenciál se mění v závislosti na rozdílu teplot. Pyroelektrické detektory jsou tvořeny krystalickým plátkem pyroelektrického materiálu, což je nejčastěji deuterizovaný triglycinsulfát (DTGS). Tyto detektory pracují na principu měření změny povrchového náboje, který vzniká na povrchu pyroelektrického materiálu, ten je vrstevnatě nanesen mezi dvě elektrody. Dopadající IČ záření způsobuje změny v kapacitance materiálu snímače. Pyroelektrické detektory se vyznačují rychlou dobou odezvy a jsou často používány v kombinaci s Fourierovou transformací (FTIR). Poslední skupina detektorů jsou fotoelektrické využívající polovodičů. Absorpcí kvant záření u nich dochází k přechodu do vyšších energetických stavů a tím k poklesu elektrického odporu polovodiče. Polovodič nanesený v tenké vrstvě na skleněný povrch je utěsněn v evakuovaném obalu. Materiál pro polovodiče je často používán HgCdTe (MCT) nebo PbSe. Tyto detektory se také používají ve FTIR, protože jsou citlivější a rychlejší než pyroelektrické detektory [30].

### 2.2.1 Nedisperzní infračervený spektrometr

Nejčastěji používaný analyzátor pro stanovení CO<sub>2</sub> je nedisperzní infračervený spektrometr (NDIR). Principem zjištění obsahu oxidu uhličitého pomocí NDIR je zeslabení intenzity IČ záření ve specifické vlnové délce. NDIR se skládá ze zdroje IČ záření (žárovka s wolframovým vláknem), modulátoru, vzorkovací kyvety nebo světlovodné trubice a filtru s IČ detektorem. Paralelně je zapojena druhá kyveta obsahující referenční plyn, tím je obvykle dusík. Modulátor umístěný za zdrojem IČ záření

slouží k průběžnému vyrovnávání a zesilování signálu analyzátoru a tím umožňuje měření dvou různých plynů [31]. Blokové schéma NDIR analyzátoru je zobrazeno na obr. 2.



**Obr. 2** Blokové schéma NDIR analyzátoru

1 – zdroj IČ záření, 2 – modulátor, 3 – vstup plynu, 4 – výstup plynu, 5 – vzorkovací kyveta, 6 – referenční kyveta, 7 – filtry, 8 – detektor

**Fig. 2** Block diagram of NDIR analyzer

1 – IR radiation source, 2 – modulator, 3 – gas inlet, 4 – gas outlet, 5 – sampling cell, 6 – reference cell, 7 – filters, 8 – detector

Infračervené záření vycházející ze zdroje je upravováno tak, aby bylo možné je nastavit na požadovaný signál, a následně vstupuje do vzorkovací kyvety. Pokud je koncentrace v komoře nulová, detektor přijme plnou intenzitu záření. Jak dochází k navyšování koncentrace, tak se intenzita IČ záření dopadajícího na detektor snižuje. Pokud vzorkovací kyvetou prochází vzorek, tak absorbuje určité vlnové délky, které jsou vysílány zdrojem IČ záření. Absorpce vlnových délek je měřena detektorem s optickým filtrem. Filtr, který je umístěn před detektorem, eliminuje veškeré ostatní záření, kromě vlnových délek, jenž vzorek může absorbovat. Na tomto základě je pak vypočítána aktuální koncentrace CO<sub>2</sub> v měřeném vzorku [31].

U těchto analyzátorů je důležitý zdroj infračerveného záření, který excituje molekuly plynu. Pro tyto účely se používají mikro žárovky, které by měly dosahovat co nevyšších teplot, aby zajistily dostatečně vysokou výstupní intenzitu. Nejčastěji se používá wolframových vláken, která dosahují vyšších teplot ve srovnání s jinými vlákny či keramickým topnými prvky. Nevýhoda skleněných žárovek je v tom, že skleněný obal omezuje přenos spektrální oblasti a tím omezuje typy molekul plynu, které mohou být měřeny tímto druhem spektrometru. Z tohoto důvodu je snaha používat co nejtenčí skleněné obaly žárovek, které snižují absorpci IČ záření a tím poskytují vyšší výstupní intenzitu záření. U zdrojů IČ záření se požaduje, aby dosahovaly vysokého výstupu infračerveného záření, měly přesnou polohu vláknka, co nejmenší velikost a dlouhou životnost (uvádí se v rozmezí 5 000 až 10 000 hodin) [31, 32, 33].

Využití různých absorpčních pásů v IČ spektrometrii umožňuje, aby senzory byly specifické pro stanovený plyn. Například oxid uhličitý nejvíce absorbuje IČ záření při vlnové délce 4,3 μm, kde se jeho absorpční oblast nepřekrývá s vodní parou, která má absorpční pásy v rozmezí 2,5 – 2,9 a 5,2 až 7,5 μm [33].

Intenzita zářivého toku se snižuje se zvětšující se délkou dráhy. Kratší délka dráhy poskytuje vyšší výstupní signál z IČ detektoru, ale snižuje se citlivost díky kratší optické dráze absorbovaného plynu [33].

NDIR analyzátorů jsou přesné, dlouhodobě stabilní, s dlouhou životností a jsou schopny měřit koncentraci CO<sub>2</sub> od nulové hodnoty, ale i ve vysokých koncentracích. Nevýhoda je jejich vyšší pořizovací cena [34].

Kalibrace se provádí buď pomocí testovacího plynu, nebo pomocí kyvety, která je naplněna oxidem uhličitým [34].

### 2.3. Elektrochemické senzory

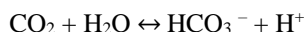
V praxi rozšířené elektrochemické snímače se rozdělují na potenciometrické a amperometrické membránové senzory. Potenciometrické senzory pracují v bezproudovém stavu a signálem je napětí mezi měřicí a referenční elektrodou [26].

Pro účely stanovení oxidu uhličitého se používá pouze potenciometrických senzorů, amperometrické snímače našly uplatnění zejména v lékařství pro stanovení obsahu kyslíku v krvi. Uspořádání obou senzorů je prakticky identické, ale u potenciometrického senzoru se používá iontově selektivní (ISE) elektrody. Tato elektroda je připevněna k semipermeabilní membráně a to tak, aby se mezi nimi vytvořil film vnitřního elektrolytu. Membrána zajišťuje, aby k ISE elektrodě prošly pouze plynné látky [26, 35].

Potenciometrický senzor pracuje na principu elektrochemické reakce, která je doprovázena vznikem volných elektronů, které vykazují velice nízký proudový signál daný koncentrací analytu. Po průchodu plynu porézní membránou do těla senzoru dojde k reakci mezi molekulami stanovovaného plynu s elektrolytem. Elektrolyt v tomto případě byl zvolen tak, aby v něm docházelo ke změnám, které je ISE elektroda schopna zaznamenat [35].

Jak bylo zmíněno, potenciometrické senzory se využívají nejen ke stanovení CO<sub>2</sub>, ale i dalších plynů, jako např.: SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, NO<sub>2</sub>. Selektivita elektrod je dána složením vnitřního roztoku elektrolytu a typem detekční elektrody [35].

Vnitřní roztok elektrolytu je pro stanovení CO<sub>2</sub> tvořen NaHCO<sub>3</sub> a detekční elektroda je skleněná iontově-selektivní elektroda. Oxid uhličitý vstupuje přes membránu do elektrolytu a dochází zde k reakci [36]:



Koncentrace hydrogenuhličitánu v roztoku vnitřního elektrolytu se v důsledku protolytických reakcí mění jen zanedbatelně, čímž je jeho aktivita udržována na konstantní hodnotě ( $a'_{\text{HCO}_3} = a$ ). Snímaná hodnota pH je tak přímo úměrná rozpuštěnému množství CO<sub>2</sub> ve vnitřním roztoku elektrolytu [36].

$$a'_H = \frac{K_{\text{CO}_2}}{a} \cdot a'_{\text{CO}_2}$$

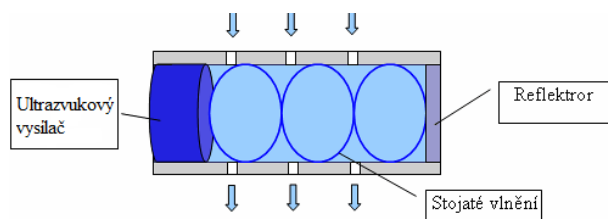
Elektrochemický senzor vykazuje celkem dobré vlastnosti pro stanovení CO<sub>2</sub>, ale jeho nevýhoda je krátká životnost (1 až 2 roky). Pro zachování přesnosti měření musí být často kalibrován, aby se kompenzovaly změny citlivosti senzoru. Kvůli této časté kalibraci se dané přístroje používají spíše v přenosných analyzátoch než stacionárních systémech [7].

## 2.4. Elektroakustické senzory

Elektroakustické senzory vyhodnocují změnu kmitočtu ultrazvukových vln procházejících vzorkem, k níž dochází vlivem přítomnosti analytu. Aktuální koncentrace oxidu uhličitého je stanovena ze závislosti změny kmitočtu na koncentraci CO<sub>2</sub> ve vzduchu [37, 38].

Princip akustické metody je neselektivní, což omezuje její aplikovatelnost na takové situace, kde je známo složení plynu a variabilita střední molekulové hmotnosti koreluje s koncentrací CO<sub>2</sub>. Takovéto podmínky jsou nejčastěji splněny právě v uzavřených prostorách, kde dochází k procesu dýchání [39].

Základní konstrukce elektroakustického senzoru je znázorněna na obr. 3. Sestává se z ultrazvukového vysílače (většinou pracující na frekvenci 40 kHz) spojeného s akustickým rezonátorem. Akustický rezonátor je soustava trubek o délce odpovídající vztahu:  $n \cdot \lambda / 2$ , kde  $\lambda$  je vlnová délka při dané frekvenci, pro 40 kHz je  $\lambda$  rovna hodnotě 8,5 mm, písmeno  $n$  značí celé číslo [39].



**Obr. 3** Uspořádání elektroakustického senzoru [37]

**Fig. 3** An electro acoustic sensor arrangement [37]

Elektroakustické senzory jsou v porovnání s NDIR senzory výhodnější z hlediska nákladů, rozměrů, tak i doby odezvy. Jejich přední výhodou je dlouhodobá stabilita bez nutnosti opakovaných kalibrací [37, 39].

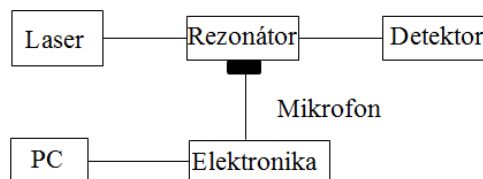
## 2.5. Fotoakustické senzory

V roce 1880 Alexander G. Bell objevil fotoakustický efekt, který je základem pro fotoakustickou spektroskopii (PAS). Při tomto jevu dochází k ozařování vzorku přerušovaným světlem, čímž látka emituje akustické vlny stejné frekvence, jako jsou frekvence světelných impulzů. Poprvé byla fotoakustická metoda použita při analýze plynu v roce 1938, kdy Viengerov zkoumal absorpci infračerveného záření černého tělesa v plynech, aby stanovil koncentrace ve směsi. Rostoucí zájem o PAS nastal až v poslední době díky vynalezení vysoce citlivých mikrofonů a dalších významných zlepšení v oblasti elektroniky [40, 41].

Detekce plyných složek PAS je řízena dvěma kroky. Nejdříve dojde k absorpci modulovaného záření o předem určené vlnové délce a k uvolnění tepla ve vzorku

plynu díky neradičnímu uvolnění excitovaných stavů. Následně se moduluje zdroj záření při akustické frekvenci a změny teploty vyvolají změnu tlaku, čímž vznikají tlakové vlny, které se detekují jako akustický signál. Tento signál se nejdříve zesílí v zesilovači a poté zaznamená pomocí mikrofonů umístěných v rezonanční cele [42, 43].

Klasický fotoakustický spektrometr se skládá ze zdroje záření, modulátoru, akustické cely a zařízení pro získání a zpracování signálu. Blokové schéma takového spektrometru je zobrazeno na obr. 4 [43].



**Obr. 4** Základní uskupení PA spektrometru [43]

**Fig. 4** Basic arrangement of PA spectrometer [43]

Zdroj, který je použitelný v PAS, by měl ideálně poskytovat velkou intenzitu monochromatického záření, mít vysokou stabilitu, spolehlivost a být laditelný v širokém rozsahu. Celý spektrální rozsah (od viditelného po infračervené záření) lze pokrýt polovodičovými lasery. Ty se v dnešní době přednostně využívají pro danou metodu. Je možné použít i černého tělesa nebo LED zdroje [43, 44].

Měření pomocí PA metody začíná změnou laserového záření, které prochází měřicí celou naplněnou vzorkem plynu. Dochází k absorpci modulovaného světla, která generuje akustický signál v cele. Tento signál se používá pro fotoakustické stanovení, následně je zaznamenán mikrofony, jak již bylo popsáno výše [43].

Fotoakustické senzory jsou velmi vhodné pro měření kvality vnitřního ovzduší vzhledem k jejich možnosti minimalizace a použití levných komponentů [45].

## 3. Mezinárodní norma

Obecnými požadavky vztahující se k měření znečišťujících látek ve vnitřním ovzduší se věnuje mezinárodní norma ISO 16000. Norma upravuje podmínky, které musí být kontrolovány před a během vzorkování jednotlivých ZL nebo jejich skupin. ISO 16000 se skládá z velkého množství částí, kdy každá se věnuje jiné znečišťující látce, popř. skupinám látek a jejich stanovení.

Velká pozornost je v této normě věnována přípravě a plánování stanovení oxidu uhličitého ve vnitřním ovzduší. Pečlivé a správné měření této složky vnitřní atmosféry je důležité v několika ohledech. Výsledky mohou mít dopad na nápravná opatření, která ale v případě chybného měření nemusí mít správný efekt [46].

Před samotným měřením CO<sub>2</sub> musí být stanoven cíl měření. Koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti se může měřit buď jako ukazatel znečištění vzduchu pocházející od lidského působení, nebo pro získání přehledu o výměně vzduchu v místnosti [46].

Koncentrace je kontinuálně zaznamenávána během určité doby během zamýšleného využívání dané místnosti, např. obsazení osobami. Měření započne až po důkladném provětrání místnosti, takže výchozí bod je roven koncentraci CO<sub>2</sub> v okolním vzduchu. Pokud je konstantní výměna vzduchu, koncentrace CO<sub>2</sub> je stanovena celkem rychle. Ovšem v případě otevření okna/dveří je tato změna provázena rychlým poklesem koncentrace. V mechanicky větraných místnostech se doba měření pohybuje kolem jedné hodiny po spuštění klimatizace a ventilace a poté v přítomnosti uživatelů. Obdobný postup je pro místnosti využívající volné ventilace. V případě určování účinnosti ventilačního systému obsazené místnosti se měření spustí zhruba po dvou hodinách od zapnutí klimatizačního a ventilačního systému v daném prostoru. Pro správné vyhodnocení koncentrace ve vnitřním ovzduší se současně musí změřit koncentrace CO<sub>2</sub> v okolním vzduchu ve stejné oblasti a to ideálně ve stejný den, kdy probíhá měření v místnostech. Toto platí pro oba systémy ventilace [46].

Pokud mají být zaznamenány emisní charakteristiky nějakého místního zdroje znečištění v místnosti, je nutno zaznamenávat koncentraci analytu kontinuálně po delší dobu. Doba záznamu není nijak definována, protože je obtížné ji dopředu stanovit. Musí však být zvolena tak, aby čas aktivity zdroje spadl do doby měření [46].

U místností o užité ploše do 50 m<sup>2</sup> je dostačující jeden vzorkovací bod v místnosti, který by měl být ve výšce 1,5 m a vzdálenosti 1 až 2 metry od stěn. Pro místnosti o větší ploše je doporučeno více vzorkovacích bodů, aby bylo zajištěno, že dojde k zaznamenání všech možných změn. Dále je doporučeno umístit měřicí přístroje ve vzdálenosti 1,5 až 2 metry od osob z důvodu zamezení přímého vlivu vydechaného vzduchu na techniku [46].

V případě neznámého zdroje v místnosti by měla být pozice sondy měněna každých 5 až 10 minut, aby se našlo místo s nejvyšší koncentrací a lokalizoval se zdroj znečištění [46].

Pro prostory, které jsou větrány mechanicky, je důležité měřicí sondu umístit na místo, kde dochází k přívodu vzduchu do místnosti, čímž se odhalí případné znečištění, které nepochází ze vzorkovaného prostoru. Jedná se o znečištění, které může být způsobené recirkulací vzduchu nebo pronikáním venkovního ovzduší do budov. To je ovlivněno blízkostí významných zdrojů znečišťování ovzduší, například vysokou dopravní zátěží [46].

Za ideálních podmínek se koncentrace CO<sub>2</sub> zaznamenává kontinuálně. Díky tomu je možné sledovat změny koncentrace v závislosti na čase a získat tak představu o optimálním použití ventilace. Také v případě, že nás zajímá pouze určitý časový úsek, je tak snazší si zjistit koncentrace v dané době, a to odečtením z naměřené křivky [46].

V závislosti na plánování měření je nezbytné stanovit, jak bude popsána nejistota měření, a jaké výkonnostní charakteristiky budou použity k prezentaci výsledků měření. Nejistota měření je dána omezeným roz-

sahem při odběrech vzorku nebo při analytickém stanovení. Reprezentativnost každého měření je ovlivněna změnou koncentrace v čase a prostoru [46].

Výsledky měření jsou obvykle uváděny jako objemový zlomek. A ve výsledcích měření se uvádějí číselné údaje tak, aby poslední desetinné místo současně odráželo řád nejistoty měření. Dále tato norma specifikuje jednotlivé části, které musí být obsaženy v protokolu o měření [46].

#### 4. Použití analyzátorů v praxi

V předešlých kapitolách byly vysvětleny principy metod stanovení oxidu uhličitého a požadavky mezinárodní normy, které definují postupy měření emisí diskutovaného plynu.

Tab. 2 uvádí porovnání vybraných analyzátorů ke stanovování CO<sub>2</sub>, které jsou dostupné na trhu. Pro jednotlivé meze detekce u detekčních trubic je dán určitý rozsah teploty a absolutní vlhkosti. U analyzátoru v kombinaci FTIR jsou v tabulce uvedeny meze stanovitelnosti v případě použití optických kyvet s délkou optické dráhy 2 m. Lze však použít i kyvet s delší optickou dráhou, například 10 metrů nebo i 100 metrů. Tyto kyvety pak slouží ke specifickým účelům.

Oxid uhličitý ve venkovním ovzduší je dlouhodobě sledovaný skleníkový plyn, jehož měření je realizováno na velkém počtu měřicích stanic po celém světě. Pro sledování koncentrace CO<sub>2</sub> v okolním ovzduší se využívá kontinuálního záznamu dat. Pro tento typ záznamu se dle literárních zdrojů nejčastěji využívá nedisperzních infračervených analyzátorů, plynové chromatografie v kombinaci s FID detektorem, popřípadě analyzátorů s Fourierovou transformací [47, 48, 49]. Například studie od Lee J. K. et al. se věnovala testování mobilních senzorů CO<sub>2</sub>, které byly připevněny k autům a komplexně monitorovaly velké geografické rozlohy. Jako analyzátor oxidu uhličitého byl opět použit infračervený analyzátor, což jen dokazuje jeho variabilitu a možnost použití i v malých rozměrech [50]. Studie, které se zabývaly testováním koncentrace CO<sub>2</sub> ve vnějším prostředí, vykazují výsledky, které jsou v souladu s průměrnou koncentrací CO<sub>2</sub> poskytovanou observatoří Manua Loa na Havaji [9]. Kromě výše zmíněných nejčastěji používaných analyzátorů se testuje Cavity Ring-Down spektroskopie (CRDS), která v porovnání např. s NDIR dosahuje přesnějších výstupních hodnot, umí rychleji zareagovat na změny okolního vzduchu a jednotka pro sušení vstupujícího vzduchu poskytuje kratší dobu prodlevy [51].

Pro měření oxidu uhličitého v půdním vzduchu se nejčastěji používá přístup doporučený Environmental Protection Agency (EPA) založený na použití průtočných komor ve statickém nebo přenosném uspořádání [52]. Porovnání přesnosti měření těchto dvou typů komor je provedeno ve studii od U. Sainju et al. [53], kde se jako výstupní analyzátor koncentrace CO<sub>2</sub> používá buď infračervený analyzátor nebo plynová chromatografie. Ze studie vyplývá, že použití přenosné komory dosahuje velmi podobných výsledků jako statická komora a použití jedné nebo druhé komory nepřinese rozdílné výsledky [53].

**Tab. 2** Porovnání vybraných analyzátorů  
**Tab. 2** Comparison of selected analyzers

Typ analyzátoru	Informační hodnota	Selektivita	Rozsah měření (obj. zlomek)	Mez stanovitelnosti
Detekční trubice (výrobce: Gastec)*	Offline hodnoty	CO <sub>2</sub>	100 – 400 ml·m <sup>-3</sup> 2,5 – 40 % 300 – 5 000 ml·m <sup>-3</sup> 10 – 100 % 0,5 – 20 % 0,13 – 6 %	
NDIR Model 60i Multi-Gas Analyzer (výrobce: Thermo-Fisher Scientific)	Online hodnoty	CO, CO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> a O <sub>2</sub>	500 ml·m <sup>-3</sup>	0 – 5 %
NDIR Testo 435-4 (výrobce: TESTO)	Online hodnoty	CO <sub>2</sub>	0 – 10 000 ml·m <sup>-3</sup>	±50 ±2% z nam. hod. (do 5000), ±100 ±3% z nam. hod. (nad 5000)
FTIR Antaris™ IGS Gas Analyzer (výrobce: Thermo-Fisher Scientific)	Online hodnoty	CO, NO, H <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> , HCl, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , HF, CH <sub>4</sub> , CHOH a další	50 ml·m <sup>-3</sup>	Podle aplikace buď 1 nebo 0,001 ml·m <sup>-3</sup>
MG811 Solid Electrolyte CO <sub>2</sub> Gas Sensor (výrobce: Winsen)	Online hodnoty	CO <sub>2</sub>	350 – 10 000 ml·m <sup>-3</sup>	
Elektrochemický senzor UNIGAS 2000 (výrobce: AOiP)	Online hodnoty	O <sub>2</sub> , CO, NO, CO <sub>2</sub> a NO <sub>x</sub>	0 do 99.9 %	0,1 %
Fotoakustický senzor QPA63 (výrobce: Siemens)	Online hodnoty	CO <sub>2</sub>	0 – 2 000 ml·m <sup>-3</sup>	10 %
NDIR senzor RLA 100 (výrobce: PCA instruments)	Online hodnoty	CO <sub>2</sub>	0 – 50 000 ml·m <sup>-3</sup>	0,5 %

\*Meze detekce detekčních trubic od výrobce Dräger jsou uvedeny v kapitole 2.1

## 5. Závěr

Stanovení oxidu uhličitého ve vnitřních prostorách se stává stále aktuálnější tématem. Oxid uhličitý při vyšších koncentracích, které jsou způsobovány špatnou ventilací místností, používáním různých přístrojů uvnitř prostor a dalšími aspekty, negativně působí na člověka, a tím se stává nežádoucí složkou vnitřního ovzduší. Ke zjištění jeho aktuální koncentrace a tím snížení jeho negativních dopadů na člověka se používá různých metod.

K prvnímu průzkumu situace v místnosti se využívají nejčastěji detekční trubice, které zajistí včasnou výstrahu zvýšené koncentrace CO<sub>2</sub>. Je důležité zmínit, že stanovení koncentrace CO<sub>2</sub> pomocí detekčních trubic je pouze orientační. Takové měření poskytuje informaci o koncentraci v daném místě a čase, ale už nezobrazuje průběh koncentrace v určitém časovém období, které je pro stanovení CO<sub>2</sub> ve vnitřním ovzduší více potřebné. Pro kontinuální měření CO<sub>2</sub>, na jehož základě může dojít k regulačnímu zásahu do klimatizačního nebo větracího systému, jsou používány analyzátoři poskytující okamžitou odezvu, tzv. online analyzátoři. Z hlediska dostupnosti na trhu, meze detekce a dalších vlastností jsou

nejvíce používané analyzátoři na principu nedisperzní infračervené spektrometrie. Tyto analyzátoři mají v porovnání s jinými metodami stanovení lepší stabilitu čidla, jsou levné a disponují vysokou přesností.

Pro stanovení oxidu uhličitého ve vnitřním ovzduší je důležité, že existuje legislativa, která se zabývá problematikou kvality vnitřního ovzduší. Další důležitý dokument týkající se této problematiky je mezinárodní norma ISO 16000, která přesně specifikuje postup a poskytuje tak návod jak správně měřit koncentraci CO<sub>2</sub> ve vnitřních prostorech. Tento příspěvek se snažil přiblížit problematiku stanovení CO<sub>2</sub> a upozornit na důležitost kontroly kvality především vnitřního ovzduší. Přesto vše záleží pouze na vůli pověřených osob, jestli budou danou situaci řešit a vyvozovat z ní důsledky a dopady na lidské zdraví.

## Literatura

1. Sheng, Y.; Fang, L.; Nie, J. Experimental analysis of indoor air quality improvement achieved by using a Clean-Air Heat Pump (CAHP) air-cleaner in a ventilation system. *Building and Environment* **2017**, *122*, 343–353.



2. Jones, A. P. Indoor air quality and health. *Atmos. Environ.* **1999**, *33*, 4535–4564.
3. Fang, L.; Wyon, D. P.; Clausen, G.; Fanger, P. O. Sick building syndrome symptoms and performance in a field laboratory study at different levels of temperature and humidity. *Indoor Air* **2002**, *3*, 466–471.
4. Redlich, C. A.; Sparer, J.; Cullen, M. R. Sick-building syndrome. *The Lancet* **1997**, *349* (9057), 1013–1016.
5. Measuring Carbon Dioxide Inside Buildings – Why is it Important?, 2013. WSU Energy Program. <http://www.energy.wsu.edu/> (accessed Aug 29, 2017).
6. MSR Electronic. Technické materiály. Basics of gas measuring technique (accessed Aug 24, 2017). <http://www.msr-electronic.de>
7. Vafek, Z. Možnosti měření oxidu uhličitého – měřicí přístroje a čidla. [Online] 2016. <http://www.tzb-info.cz/>
8. Graphic: The relentless rise of carbon dioxide. NASA Global Climate Change. [https://climate.nasa.gov/climate\\_resources/24/](https://climate.nasa.gov/climate_resources/24/)
9. Greenhouse Gas Reference Network Site Information. NOAA, Earth System Research Laboratory. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/ggrn.php> (accessed Oct 30, 2017).
10. Zmrhal, V.; et al. *Větrání škol v souvislostech*, 1st ed.; Společnost pro techniku prostředí, z. s.: Praha, 2017.
11. Maroni, M., Seifert, B., Lindvall, T. (Eds.), 1995. *Indoor Air Quality } a Comprehensive Reference Book*. Elsevier, Amsterdam
12. Harrison, P.T.C., 1997. Health impacts of indoor air pollution. *Chemistry and Industry* **17**, 677–681.
13. Godwin, C.; Batterman, S. Indoor air quality in Michigan schools. *Indoor Air* **2007**, *17*, 109–121.
14. ASHRAE Standard 62-2001. *Indoor Air Quality*. 2001. 40 p.
15. Oliveira, M.; Slezakova, K.; Delerue-Matos, C.; Pereira, M. C.; Morais, S. Assessment of air quality in preschool environments (3e5 years old children) with emphasis on elemental composition of PM10 and PM2.5. *Environ. Pollut.* **2016**, *214*, 430–439.
16. Asadi, E.; Costa, J. J.; Gameiro da Silva, M. Indoor air quality audit implementation in a hotel building in Portugal. *Building and Environment* **2011**, *46*, 1617–1623.
17. Indoor Air Quality Monitor PS 33. Sensotron. <http://www.sensotron.pl> (accessed March 27, 2018).
18. Direct Sense IAQ. Gray Wolf Sensing Solution. <http://www.wolfsense.com> (accessed March 27, 2018).
19. Šubrt, R. Energy Consulting Service, s.r.o., *Mikroklima ve veřejných budovách jako důvod instalace rekuperace*; 2011.
20. Ye, W.; Zhang, X.; Gao, J.; Cao, G.; Zhou, X.; Su, X. Indoor air pollutants, ventilation rate determinants and potential control strategies in Chinese dwellings: A literature review. *Sci. Total Environ.* **2017**, *586*, 696–729.
21. Marques, G.; Pitarma, R. An Indoor Monitoring System for Ambient Assisted Living Based on Internet of Things Architecture. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2016**, *13* (11), 1152–1166.
22. *Gas Detection Tubes and Sampling Handbook*, 2nd ed. [online]; <http://www.raesystems.com/>
23. Ninh, H. P.; Tanaka, Y.; Nakamoto, T.; Hamada, K. A bad-smell sensing network using gas detector tubes and mobile phone cameras. *Sens. Actuators, B* **2007**, *125*, 138–143.
24. Typical Levels of Carbon Dioxide Gas CO<sub>2</sub> Normal Levels in Air Indoors & Outside, 2017. InspectAPedia®. [https://inspectapedia.com/hazmat/CO2\\_Typical\\_Levels.php](https://inspectapedia.com/hazmat/CO2_Typical_Levels.php) (accessed Aug 30, 2017).
25. Colorimetric Gas Detector Tube Handbook. Sensidyne. <http://www.sensidyne.com/> (accessed Aug 30, 2017).
26. Chemické senzory a biosenzory. Katedra měření. <http://measure.fel.cvut.cz>
27. Colthup, N.; et al. *Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy*, 2nd ed. [online]; Elsevier, 2012. <https://books.google.cz/books?uid=116083180853664721048&hl=cs> (accessed Oct 31, 2017).
28. Wathsala, M. H.; Jinadasa, N.; Jens, K.; Øi, L. E.; Halstensen, M. Raman Spectroscopy as an Online Monitoring Tool for CO<sub>2</sub> Capture Process: Demonstration Using a Laboratory Rig. *Energy Procedia* **2017**, *114*, 1179–1194.
29. Skácel, F.; Tekáč, V. *Měření emisí*; Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: Praha, 2002.
30. Infra red Absorption Spectroscopy; Instrumentation. Sheffield Hallam University. <http://teaching.shu.ac.uk/hwb/chemistry/tutorials/molspec/irspec3.htm> (accessed Aug 31, 2017).
31. International Light Technologies. <https://www.intl-lighttech.com/applications/light-sources/ndir-gas-sensor-lamps>
32. Hodgkinson, J.; Smith, R.; Ho, W. O.; Saffell, J. R.; Tatam, R. P. Non-dispersive infrared (NDIR) measurement of carbon dioxide at 4.2 in a compact and optically efficient sensor. *Sens. Actuators, B* **2013**, *186*, 580–588.
33. Vincent, T. A.; Gardner, J. W. A low cost MEMS based NDIR system for the monitoring of carbon dioxide in breath analysis at ppm levels. *Sens. Actuators, B* **2016**, *236*, 954–964
34. Zevenbergen, M. SENSORS FOR AIR QUALITY MONITORING, 2015. KIVI Engineering Society. <https://www.kivi.nl/uploads/media/55264396beb61.pdf> (accessed Aug 31, 2017).

35. Senzory plynných látek. Opekar F.: skripta Senzory, PACI, Praha 2007, str. 186-202 (ISBN 978-80-86238-20-3).
36. Morf, W. E. The Principles of Ion-Selective Electrodes and of Membrane Transport; Elsevier, 2012. (ISBN 0444597557)
37. Pracujete ve zdravém prostředí? Měření oxidu uhličitého v budovách. tzbinfo. <http://vetrani.tzbinfo.cz/vnitri-prostredi/5827-pracujete-ve-zdravem-prostredi> (accessed Sept 04, 2017).
38. Acoustic Wave Sensors. SENGENUITY. [http://www.sengenuity.com/tech\\_ref/AWS\\_Web-Version.pdf](http://www.sengenuity.com/tech_ref/AWS_Web-Version.pdf) (accessed Sept 04, 2017).
39. Granstedt, F.; Hök, B.; Bjurman, U.; Ekström, M.; Bäcklund, Y. New CO<sub>2</sub> Sensor With High Resolution and Fast Response. 23rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society; Ed.; 2001.
40. ABC's of Photoacoustic Spectroscopy. Shimadzu. <http://www.shimadzu.com/an/ftir/support/ftir-talk/talk7/intro.html> (accessed Sept 04, 2017).
41. Viegerov, M.L. Eine Methode der gasanalyse, beruhend auf der optisch-akustischen tyndall-röntgenerscheinung. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **1938**, *19*, 687–688.
42. Sigrist, M.W. *In Air Monitoring by Spectroscopic Techniques*; Sigrist, M.W., Ed.; Wiley: New York, NY, USA, 1994; pp. 163–227.
43. Elia, A.; Lugarà, P. M.; Di Franco, F.; Spagnolo, V. Photoacoustic Techniques for Trace Gas Sensing Based on Semiconductor Laser Sources. *Sensors* **2009**, *9*, 9616–9628.
44. Thyagarajan, K.; Ghatak, A. *Lasers Fundamentals and Applications*, 2nd ed.; Springer: New York, 2010.
45. Pernau, H. F.; Schmitt, K.; Huber, J.; Rademacher, S.; Eberhardt, A.; Wöllenstein, J. 30th Eurosensors Conference, EUROSENSORS 2016. *Procedia Engineering* **2016**, *168*, 1325–1328.
46. ISO 16000. *Indoor air - Part 26: Sampling strategy for carbon dioxide*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2012. 14 p
47. Zellweger, C.; et al. Assessment of recent advances in measurement techniques for atmospheric carbon dioxide and methane observations. *Atmospheric Measurement Techniques* **2016**, *9*, 4737–4757.
48. Vardag, S. N.; et al. Comparisons of continuous atmospheric CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O measurements – results from a travelling instrument campaign at Mace Head. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2014**, *14*, 8403–8418
49. Wang, K. Y.; Wang, J. L.; Liu, W. T. Ambient carbon dioxide concentrations in industrial park areas: A monitoring and modeling study. *Atmospheric Pollution Research* **2014**, *5*, 179–188.
50. Lee, J. K.; Christen, A.; Ketler, R.; Nesic, Z. A mobile sensor network to map carbon dioxide emissions in urban environments. *Atmospheric Measurement Techniques* **2017**, *10*, 645–665.
51. Schibig, M. F.; Steinbacher, M.; Buchmann, B.; van der Laan-Luijkx, I. T.; van der Laan, S.; Ranjan, S.; Leuenberger, M. C. Comparison of continuous in situ CO<sub>2</sub> observations at Jungfraujoch using two different measurement techniques. *Atmospheric Measurement Techniques* **2015**, *8*, 57–68.
52. Babyak, A. M. Flux Chamber Measurements: Defensible Analytical Data for Evaluating Human Health Risk. CE Schmidt. <https://www.ce-schmidt.com/index.php>
53. Sainju, U. M.; TonThat, T. C.; Caesar, A. Comparison of soil carbon dioxide flux measurements by static and portable chambers in various management practices. *Soil and Tillage Research* **2012**, *118*, 123–131.

## Summary

Barbora Miklová, František Skácel  
 University of Chemistry and Technology, Prague  
 Technická 5, 166 28 Praha 6, miklovab@vscht.cz

### *Determination of CO<sub>2</sub> emitted by anthropogenic and biogenic processes to indoor areas*

Carbon dioxide is produced by natural process and also by a number of anthropogenic activities. Thanks to this processes CO<sub>2</sub> is released into outdoor and indoor air, where it is an undesirable component in higher concentrations. The quality of indoor air has always been slightly neglected issue. However, in recent years, there has been a growing interest in this issue, because some symptoms such as headaches, eye or throat irritations etc. occur in humans more and more. These symptoms are caused by Sick Building Syndrome, which disappears after leaving a building. Indoor air contains various pollutants, which affect the symptoms mentioned above. Carbon dioxide was chosen as a representative compound for the quality of indoor air. The paper is focused on highlighting issues coming from poor air quality and brings recommendation how to avoid them. Furthermore, it states analytical methods, which can be used for the determination the concentration in the indoor and outdoor air and to draw consequences for human health.