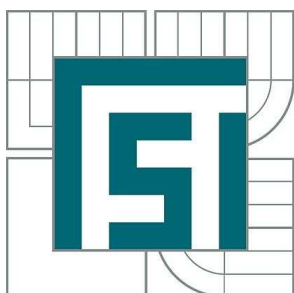


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# VĚTRÁNÍ BUDOV ŘÍZENÉ NA ZÁKLADĚ KONCENTRACE ŠKODLIVIN VE VZDUCHU

DEMAND CONTROLLED VENTILATION IN BUILDINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VÁCLAV ČERNÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL CHARVÁT, Ph.D.

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Václav Černík

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Větrání budov řízené na základě koncentrace škodlivin ve vzduchu**

v anglickém jazyce:

#### **Demand controlled ventilation in buildings**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Větrání je nezbytnou součástí zajištění zdravého prostředí uvnitř budov a současně se výraznou měrou podílí na energetické náročnosti provozu budov. V praxi se používá řada opatření jak při větrání zajistit požadovanou kvalitu vzduchu ve vnitřním prostředí, při současné snaze o minimalizaci spotřeby energie. Jedním z těchto opatření je řízení větrání na základě monitorování koncentrace škodliviny ve větraném prostoru, kdy se do větraného prostoru přivádí pouze takové množství čerstvého vzduchu, aby nebyla překročena přípustná koncentrace škodliviny.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je provést rešerši způsobů řízení větrání v budovách na základě koncentrace škodliviny ve vzduchu. Praktická část práce bude zahrnovat výpočtovou ukázkou kontinuálního a přerušovaného větrání s oxidem uhličitým jako monitorovanou škodlivinou.

Seznam odborné literatury:

Székyová, M., Ferstl, K., Nový, R., Větrání a klimatizace. JAGA GROUP, s.r.o. Bratislava 2006.

CHYSKÝ, J., HEMZAL, K., Větrání a klimatizace, Technický průvodce, svazek 31, Praha 1993.

Články v časopisech a sbornících konferencí zabývají se problematikou řízeného větrání v budovách.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Charvát, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 1.11.2010

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce řeší různé způsoby řízení větrání budov, zejména se zaměřením na řízení větrání na základě obsahu škodliviny v ovzduší. V první části jsou uvedeny některé pojmy z oblasti větrání a popis některých škodlivin. V druhé části jsou uvedeny nejčastější přístroje pro měření škodlivin. Dále jsou uvedeny různé strategie řízení větrání, jejich výhody a nevýhody. V poslední části je uveden příklad aplikace řízení větrání.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

větrání budov, řízení větrání, škodlivina, snímač škodliviny, oxid uhličitý, kvalita vnitřního ovzduší

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with different methods of building's ventilation control, especially with the focus on ventilation controlled by pollutant concentration. In the first part of the thesis, some concepts regarding ventilation and some pollutant's description are given. In the second part, the most used pollutant detectors are mentioned. Next, various ventilation control strategies are explained, along with their advantages and disadvantages. In the last part, a real-life example of ventilation control is given.

## **KEYWORDS**

building ventilation, ventilation control, pollutant, pollutant detector, carbon dioxide, indoor air quality

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ČERNÍK, V. *Větrání budov řízené na základě koncentrace škodlivin ve vzduchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Charvát, Ph.D.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Pavla Charváta, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 19. května 2011

.....

Václav Černík

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Charvátovi, Ph.D. za to, že si na mě vždy udělal čas a ochotně mi dával cenné rady a podněty pro napsání této práce.



## OBSAH

Úvod.....	11
1 Vzduch a dýchání .....	13
1.1 Fyziologie dýchání.....	13
1.2 Druhy prostředí .....	13
1.2.1 Venkovní prostředí.....	13
1.2.2 Vnitřní prostředí.....	15
1.3 Škodliviny .....	15
1.3.1 Chemické škodliviny .....	15
1.3.2 Fyzikální škodliviny .....	19
1.3.3 Biologické škodliviny.....	21
1.3.4 Ostatní škodliviny .....	21
1.3.5 Příпустné hodnoty škodlivin .....	22
2 Větrání.....	23
2.1 Co je to větrání a k čemu slouží .....	23
2.2 Přirozené větrání .....	23
2.3 Nucené větrání.....	24
2.4 Filtrace a čištění vzduchu .....	25
2.5 Tepelné ztráty .....	26
3 Snímače škodlivin.....	27
3.1 Fotoionizační detektory .....	27
3.2 Infračervené snímače .....	28
3.3 Plameno-ionizační detektor.....	29
3.4 Katalytické spalovací snímače hořlavých plynů - pelistory .....	29
3.5 Polovodičové.....	30
3.6 Elektrochemický snímač.....	30
3.7 Tepelně vodivostní snímač.....	30
4 Řízení větrání .....	31
4.1 Způsoby řízení.....	31
4.2 Řídící strategie .....	32
5 Ilustrativní případ.....	33
5.1 Zadání .....	33

5.2	Řízení přednastaveným programem.....	34
5.3	Řízení na základě obsahu CO <sub>2</sub> v učebně .....	36
5.4	Vyhodnocení .....	38
	Závěr.....	39
	Použité informační zdroje.....	40
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	42

## ÚVOD

Prostředí, ve kterém žijeme, nás ovlivňuje každý den. Jak postupuje technický vývoj a životní úroveň lidstva, zvyšují se i nároky na kvalitu vzduchu v uzavřených prostorech. Pro dosažení kvalitního vzduchu je zapotřebí vynaložit vysoké úsilí a použít velké množství energie. V souvislosti s tenčícími se zásobami fosilních paliv je však zřejmé, že spotřebu energie už nelze takto navyšovat. Proto je třeba optimalizovat spotřebu energie, aniž by to mělo negativní důsledky na kvalitu vzduchu v uzavřených prostorech.

Trendem poslední doby jsou nízkoenergetické a pasivní domy. Tyto domy mají nízké náklady na vytápění a chlazení, jelikož u nich nedochází k vysokým tepelným ztrátám přes stěny domu. Nevýhodou však je, že pro kvalitní izolaci je nutné omezit výměnu vzduchu s okolím. Tím se může zhoršit kvalita vnitřního vzduchu, což je nežádoucí. Proto je potřeba větrat, aby se vzduch uvnitř udržel kvalitní, ale zároveň musíme mít na paměti omezení tepelných ztrát.

Jednou z možností je nainstalovat tepelné výměníky mezi přívodem a odvodem vzduchu. Tím můžeme ztráty minimalizovat. Ovšem pro další minimalizaci ztrát je třeba určit minimální potřebný průtok vzduchu. Je možné tento průtok odhadnout a nastavit, mnohem přesnější metodou však je regulovat průtok v závislosti na skutečné potřebě. Cílem této práce je popsat úskalí různých přístupů k řízení větrání.



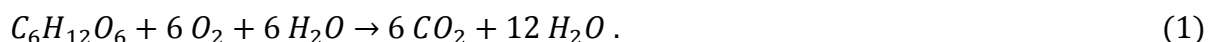
# 1 VZDUCH A DÝCHÁNÍ

## 1.1 FYZIOLOGIE DÝCHÁNÍ

Dýchání je jednou ze základních potřeb všech aerobních organismů. Prostřednictvím dýchání získáváme energii, bez kyslíku dokážeme přežít pouze několik minut. Dýchání se dělí na vnitřní a vnější.

Vnější dýcháním (respirací) se označuje doprava vzdušného kyslíku ze vzduchu do těla a doprava oxidu uhličitého z těla ven. Vzduch prochází z nosní dutiny přes hltan a hrtan do průdušnice, kde se rozdělují proudy směřující do jednotlivých průdušek. Z průdušek se vzduch distribuuje do plicních sklípků, kde vlivem difuze dochází k výměně kyslíku za oxid uhličitý mezi krví a vzduchem. Krví je pak kyslík distribuován po celém těle.

Vnitřní (buněčné) dýchání je proces, při kterém se spotřebovává kyslík a glukóza a vzniká energie. Tento děj probíhá postupně přes různé meziprodukty a pomocí enzymů. Sumárně lze děj popsat chemickou rovnicí



Při tomto ději vzniká energie, kterou si tělo uchovává ve formě ATP (adenosintrifosfátu). ATP je pak kdykoli k dispozici v případě potřeby energie.

Pro uskutečnění dýchání je kromě kyslíku potřeba také potrava. Ta tak tvoří jednu část našeho energetického příjmu. Je snadné ji skladovat, zatímco vzduch v dostatečném množství skladovat nelze. Ze stejného důvodu skladujeme v automobilech palivo, ale kyslík bereme ze vzduchu. Proto je důležitá trvalá dostupnost kvalitního vzduchu.

Bilančně námi spotřebovaný kyslík pochází z rostlin, které sníme, případně z rostlin, které sežrali námi snědení živočichové. Je to proto, že proces fotosyntézy je přesně opačný k procesu dýchání. Fyzicky sice vdechujeme kyslík vytvořený rostlinami v naší blízkosti, nicméně to nemá na celkovou bilanci vliv.

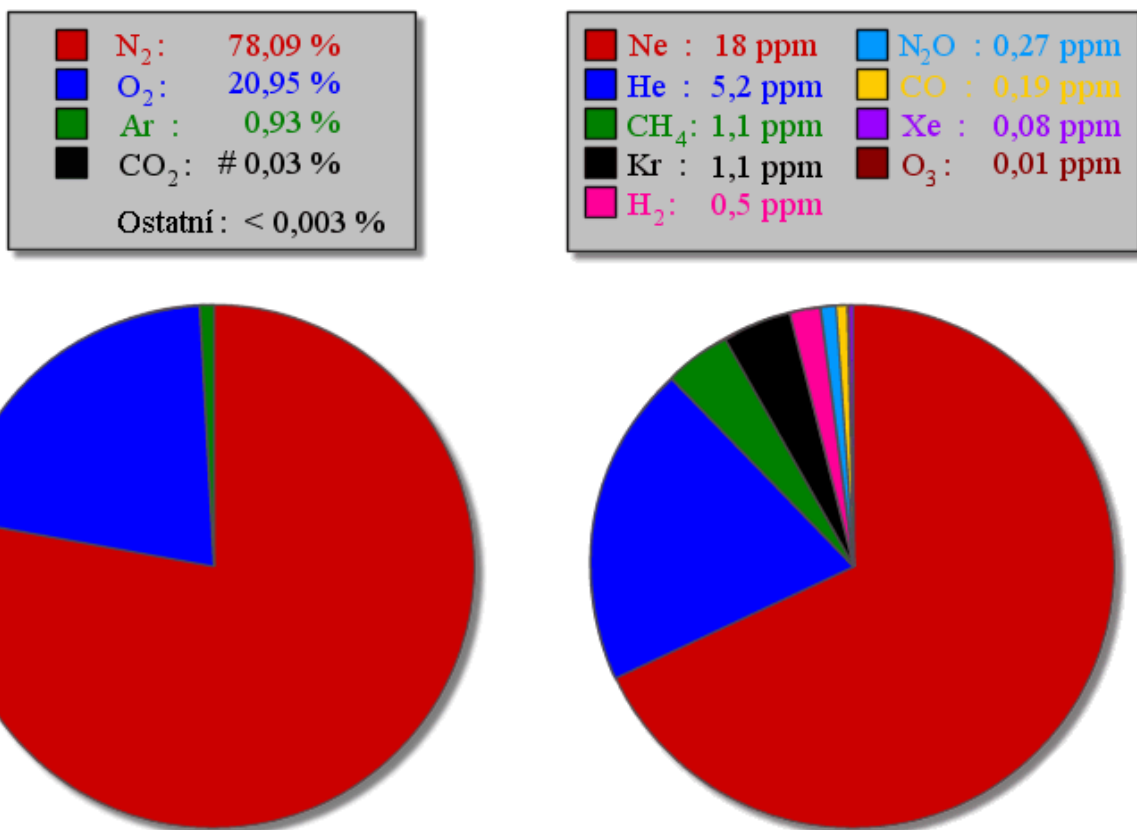
## 1.2 DRUHY PROSTŘEDÍ

### 1.2.1 VENKOVNÍ PROSTŘEDÍ

Venkovní prostředí je takové prostředí, kde ani případné pevné překážky nezaručují dostatečné oddělení vzduchu od okolního. Všichni živočichové včetně člověka se vyvíjeli ve venkovním prostředí, a proto se mu dokázali patřičně přizpůsobit. Vnější prostředí by tedy teoreticky mělo být pro lidi ideální. Tak tomu samozřejmě není. Naše tělo pracuje nejefektivněji a nejúspěšněji pouze v určitém malém rozsahu podmínek, ostatním se musíme přizpůsobovat, zejména pomocí oblékání a přirozené termoregulace. Venkovní

práce tedy může přinášet sníženou výkonnost, protože část energie a koncentrace vydáme na udržení tělesné teploty.

Venkovní prostředí je naopak velmi vhodné z hlediska složení vzduchu. Neznečištěný vzduch je svými parametry ideální, neboť se v průběhu evoluce příliš neměnil. Veškerý vydechovaný oxid uhličitý je ve vzduchu značně rozptýlen a rychle využit rostlinami k fotosyntéze. Protože je vzduch směsí kyslíku a více či méně inertních plynů, není důvod, proč by se jeho složení významně měnilo.



Obr. 1 Složení suché atmosféry při povrchu Země. Vlevo: hlavní složky, vpravo: stopové složky [1]

V přirozeném ovzduší nejsou pro člověka žádné významné hrozby. Zatímco kyslík potřebujeme k dýchání, jediným projevem dusíku a argonu je za běžných podmínek nižší koncentrace kyslíku. Oxid uhličitý při svých velice nízkých přirozených koncentracích nemá na zdraví člověka negativní účinky.

Dnešní doba ovšem dává vzniknout mnoha látkám, které složení vzduchu mění, téměř vždy k horšímu. Jejich produkce je důsledkem moderní doby a přes veškerá opatření se s jejich produkcí musí stále počítat. Horší situace obecně bývá ve městech a v průmyslových oblastech, naopak na venkově se často může ovzduší blížit ideálu, ačkoli zde často dochází ke spalování špatně hořlavých materiálů, např. listí.

### 1.2.2 VNITŘNÍ PROSTŘEDÍ

Vnitřní prostředí je takové prostředí, kde je vzduch dostatečně oddělen od okolního vzduchu pomocí pevných překážek. V takovém prostředí nejsme ovlivňováni počasím a můžeme si jeho vlastnosti přizpůsobit vlastním potřebám. Vnitřní prostředí umožňuje zvýšit kvalitu života i pracovní výkonnost, proto lidé ve vyspělých zemích tráví více než 80% času právě ve vnitřním prostředí.

Zatímco vnitřní prostředí může být optimální z hlediska tepelné pohody, větším problémem je složení vzduchu. Ve vnitřním prostředí se často vyskytuje velké množství lidí na malé ploše a dochází k nárůstu koncentrace oxidu uhličitého. Dalším problémem je velké množství různého vybavení, ať už nábytku, elektroniky nebo výrobních strojů, které produkuje různé škodliviny. Zdroje škodlivin by bylo ideální eliminovat, ovšem to není vždy možné.

## 1.3 ŠKODLIVINY

Škodliviny jsou látky a organismy, které nepříznivým způsobem ovlivňují využitelnost vnitřních a vnějších prostor, tj. obyvatelnost, vhodnost pro výrobu a jiné činnosti. Tyto látky jsou rozptýleny ve vzduchu a vdechovány lidmi. Podle způsobu působení na lidský organismus je lze rozdělit na fyzikální, chemické a biologické.

### 1.3.1 CHEMICKÉ ŠKODLIVINY

Chemické škodliviny jsou takové, které na naše tělo působí prostřednictvím chemické reakce. Jedná se o nejčastější škodliviny, jejich výskytu nelze zcela zamezit, pouze je omezit a regulovat. Jejich negativní působení bývá rychlé, účinky se mohou pohybovat od opojných po smrtelné, přičemž záleží na jejich koncentraci a zdravotním stavu postiženého člověka. Chemické škodliviny lze často odhalit čichem, ne vždy však dostatečně včas před hrozící otravou.

#### OXID UHLIČITÝ (CO<sub>2</sub>)

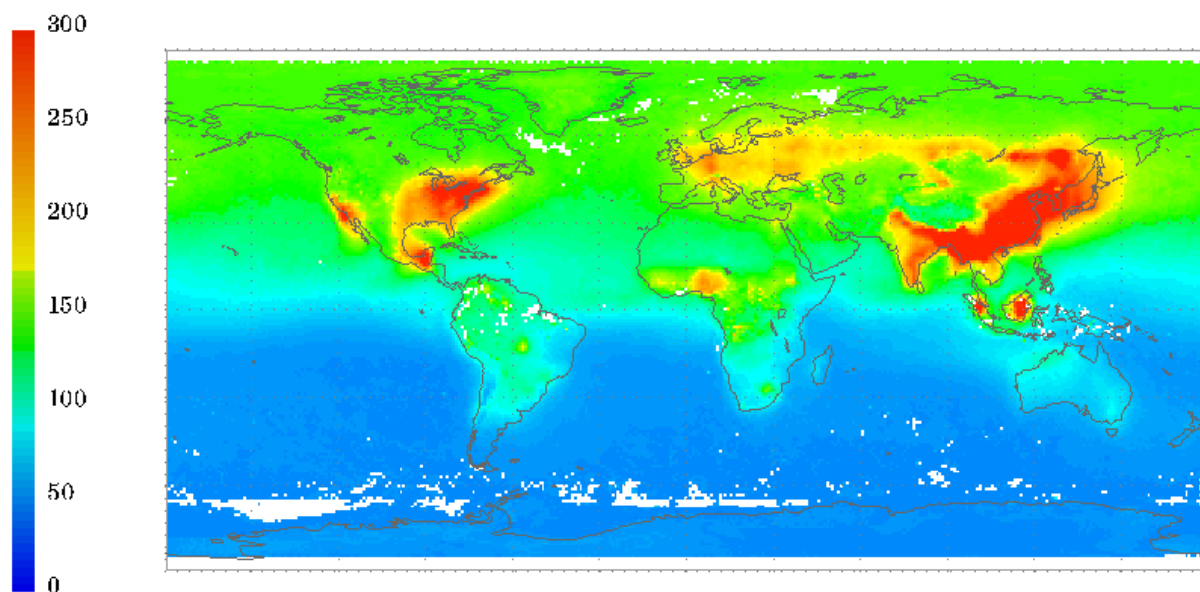
Oxid uhličitý je ve vzduchu obsažen v koncentraci cca 390 ppm. Jedná se o produkt respirace všech aerobních organismů. Vzniká také při spalování organických látek, ke kterému dochází mimo jiné i při mnoha průmyslových procesech. Při fotosyntéze zelených rostlin se za současné produkce kyslíku a cukrů oxid uhličitý spotřebovává, čímž je zajištěna rovnováha v jeho koncentraci, jelikož rostliny ho dokážou využít pouze při určité minimální koncentraci. [2]

Škodlivé účinky oxidu uhličitého jsou způsobeny jeho působením na krevní oběh. Při zvýšené koncentraci se začne vázat na hemoglobin, čímž sníží schopnost hemoglobinu vázat kyslík. Tělo tento stav rozpozná a kompenzuje jej roztažením cév a zvýšením tepu. To je jediný přirozený indikátor, protože oxid uhličitý není při vysoké koncentraci cítit ani vidět. Dalšími projevy jsou ospalost, závrať, pocení a bolest hlavy. Při dlouhodobém vystavení lidského organismu koncentraci nad 4 % už mohou být účinky smrtelné, krátkodobě však lze přežít i koncentrace výrazně vyšší.

Oxid uhličitý je škodlivina, kterou nelze zcela odstranit, jelikož vzniká průběžně. V obytných místnostech je to vhodný indikátor ke spuštění větrání, jelikož jeho koncentrace narůstá v přítomnosti lidí bez ohledu na jejich činnost.

### OXID UHELNATÝ (CO)

Oxid uhelnatý se v zemské atmosféře běžně vyskytuje v koncentraci cca 0,1 ppm. Jeho koncentrace je vyšší uvnitř budov, v rozmezí (0,5 ÷ 5) ppm. Zatímco globálně je největší množství oxidu uhelnatého přirozeně vytvořeno fotochemickou reakcí v atmosféře, lesními požáry nebo vulkanickou činností, v místě lidských obydlení má největší vliv nedokonalé spalování. Při nedokonalém spalování nemá palivo dostatek kyslíku k hoření a vytvoří se molekula oxidu uhelnatého. K jeho produkci však dojde například i u dobře seřízeného plynového sporáku. Nejvyšším producentem v aglomeracích je automobilová doprava, zejména pokud je velký podíl aut bez katalyzátoru. Vzniku oxidu uhelnatého v uzavřených prostorech je nejlepší předcházet, veškerá zařízení využívající spalování musí být dobře seřízena a řízena. [3]



Obr. 2 Koncentrace CO [ppb], naměřená v dubnu 2011 satelitem MOPITT [4]



Škodlivé účinky jsou podobné jako u CO<sub>2</sub>. Oxid uhelnatý se váže na hemoglobin a znemožňuje mu tak navázat kyslík. Tělo však tento stav nedokáže identifikovat, lidé navíc oxid uhelnatý necítí a nevidí a nemusí si proto uvědomovat hrozící nebezpečí. Dochází k výraznému omezení dodávky kyslíku především do mozku, dostavuje se únava, ospalost a bolest hlavy. Zákeřnost oxidu uhelnatého spočívá zejména v jeho narkotických účincích. Koncentrace nad 400 ppm může způsobit bezvědomí a poškození mozku, bez cizí pomoci pak obvykle dojde k úmrtí. [5]

### **OXIDY DUSÍKU (NO<sub>x</sub>)**

Oxidy dusíku jsou příbuzné škodliviny vzniklé sloučením dusíku s kyslíkem. Oxid dusnatý (NO) se v přírodě téměř nevyskytuje, oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>) v koncentraci 0,3 ppm. Oxid dusnatý vzniká ve vzduchu endotermickou reakcí při teplotě nad 1000°C, oxid dusičitý pak vzniká jeho následnou oxidací. V přírodě vznikají zejména působením blesků, mnohem významnějším zdrojem je však spalování za vysokých teplot, především ve spalovacích motorech a elektrárnách. Emise lze omezit řízeným třicestným katalyzátorem v případě zážehových motorů a selektivní katalytickou redukcí v případě vznětových motorů a tepelných elektráren.

Oxid dusnatý je méně toxický než oxid dusičitý, jedná se navíc o biologicky významnou sloučeninu. Jeho největší nebezpečí spočívá právě v produkci oxidu dusičitého. Ten je štiplavý a jeho přítomnost lze rozpoznat čichem, nicméně při koncentraci cca 4 ppm způsobí znečistivění nosu. Při koncentracích nad 40 μg·m<sup>-3</sup> může způsobit plicní edém, který se ovšem objeví až několik hodin po inhalaci plynu. [6]

Kromě těchto dvou oxidů dusíku je ve vzduchu stabilní ještě oxid dusný (N<sub>2</sub>O), který se používá mimo jiné jako anestetikum. Tento plyn je v obvyklých koncentracích neškodný.

### **OZÓN (O<sub>3</sub>)**

Ozón se vyskytuje především v zemské stratosféře. Zde působením ultrafialového záření dojde k rozštěpení molekuly kyslíku O<sub>2</sub> na atomy kyslíku, které následně vytvoří ozón. Působením volných radikálů naopak atom kyslíku a ozón vytvoří opět molekulární kyslík, čímž se vytváří ozónová díra. Přízemní ozón se v přírodě vytváří působením blesků, významnější je však jeho produkce lidskou činností. Vzniká fotochemickou reakcí oxidů dusíku a uhlovodíků, přičemž jeho reaktivita dává vzniknout dalším škodlivinám a vzniká znečištění atmosféry známé jako fotochemický smog. Ozón také vzniká při provozu laserových tiskáren.

Samotný ozón coby silné oxidační činidlo působí negativně na respirační a kardiovaskulární systém. Může způsobovat astma, bronchitidu a infarkt.

### TĚKAVÉ ORGANICKÉ SLOUČENINY (VOC)

Těkavé organické sloučeniny (VOC z anglického Volatile Organic Compounds) jsou v přírodě široce rozšířené. Největší množství VOC se vytváří v listech rostlin, zejména izopren, nicméně se nejedná o nebezpečné koncentrace. Nebezpečné VOC vznikají pouze lidskou činností a obecně se jedná o látky s bodem varu méně než 250 °C, které mají nejrůznější technické využití, jako čisticí prostředky, rozpouštědla, lepidla a pohonné hmoty. Mezi nejvýznamnější patří formaldehyd, toluen, xylén, etanol, benzen, aceton a benzín. Vysoký výskyt VOC v budovách je zapříčiněn jejich použitím na nejrůznějších přístrojích, nábytku a v nátěrech. Mnoho VOC patří mezi oděry, tedy látky, které člověk dokáže vnímat čichem.

Vzhledem k velkému množství různých sloučenin jsou i účinky na lidský organismus různé. Především se jedná o podráždění sliznic, bolest hlavy, alergie, dýchací potíže, nevolnost, některé mohou způsobovat i rakovinu.



*Obr. 3 Barvy obsahují vysoké množství VOC [7]*

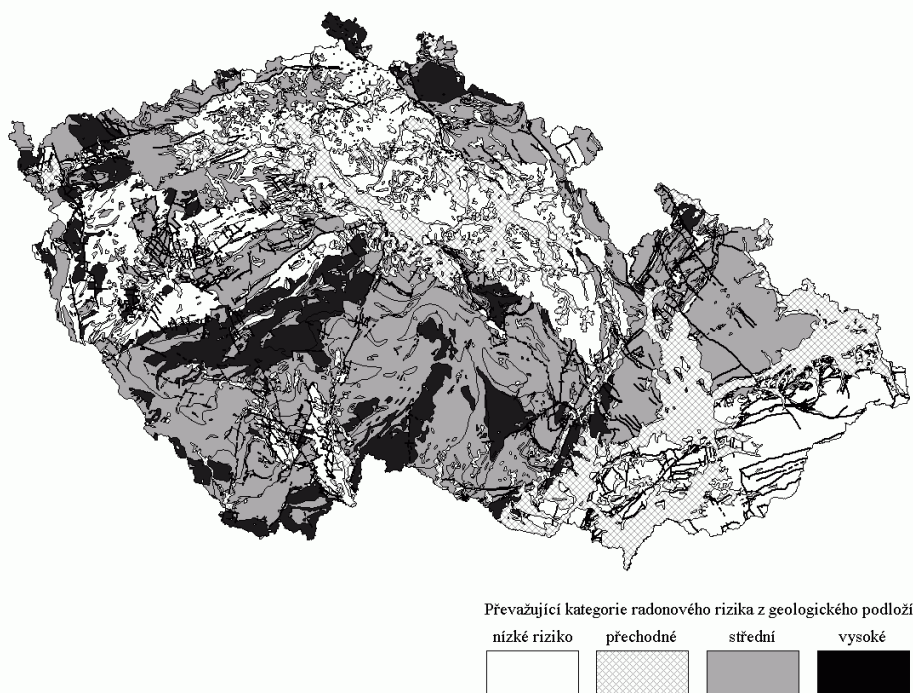
### 1.3.2 FYZIKÁLNÍ ŠKODLIVINY

Fyzikální škodliviny jsou takové, které na naše tělo působí procesem s určitým fyzikálním základem. Jedná se především o radon, azbest a prach, jejichž působení na organismus je zcela odlišné, ačkoli důsledky mohou být podobné.

#### RADON

Radon vzniká vlivem rozpadu radioaktivních prvků v zemské kůře. Dnes je známo 36 izotopů radonu, nicméně pouze 4 z nich se vyskytují v přírodě. Z těch má význam izotop  $^{222}\text{Rn}$  s poločasem rozpadu 3,824 dne, vzniklý rozpadovou řadou z izotopu uranu  $^{238}\text{U}$ , a izotop  $^{220}\text{Rn}$  s poločasem rozpadu 55,6 sekund z rozpadové řady izotopu thoria  $^{232}\text{Th}$ . Dále se vyskytuje izotop  $^{219}\text{Rn}$  s poločasem rozpadu 3,96 sekund z rozpadové řady  $^{235}\text{U}$  a izotop  $^{218}\text{Rn}$  s poločasem rozpadu 35 ms z pokračování rozpadové řady  $^{222}\text{Rn}$ . [8]

Pokud se mluví o výskytu radonu, myslí se tím téměř vždy  $^{222}\text{Rn}$ . Do obydlí se dostává špatně provedenou podlahou a izolací a nejvyšší koncentrace dosahuje ve špatně větraných budovách. V budovách s dostatečnou ventilací dosahuje stejné koncentrace jako mimo budovu. Radon se může vyskytovat i ve stavebních materiálech. Nejlepší obranou proti radonu je vůbec ho nepustit do obydlí, pomocí různých speciálních opatření. Hodnotu radonu lze naměřit již před stavbou a je možné zjistit si předem pravděpodobnost výskytu radonu v dané lokalitě.



Obr. 4 Geologická prognózní mapa radonového rizika [9]

Nebezpečí radonu spočívá ve vytváření částic alfa. Ty narušují lidskou DNA a mohou způsobit rakovinu, zejména rakovinu plic. Přitom se nejedná pouze o rozpad radonu, ale i produktů jeho rozpadu. Dalším rizikem je působení olova, které je stabilním produktem rozpadové řady, na plíce.

### **AZBEST**

Azbest je minerál ze skupiny silikátů, jehož krystaly tvoří dlouhá vlákna. Dříve se hojně používal pro svou tepelnou odolnost, zejména ve stavebních materiálech, loďařství, v automobilových brzdách a spojkách a dokonce i v prvních cigaretových filtrech. Dnes je však v celé Evropské unii zakázán a setkáme se tak s ním pouze u starších budov.

Nebezpečí azbestu spočívá v jeho vláknité struktuře. Vlákna se snadno dostanou do vzduchu a vdechnutím do plic. Zde se zabodnou do plicních sklípků a tělo není schopno se jich zbavit. Postupem času se pak v jejich okolí může objevit rakovinné bujení.

### **PRACH**

Zařazení prachu mezi fyzikální škodliviny není zcela přesné, jelikož může působit i biologicky a chemicky. Prach je obecně shluk částic menších než 500  $\mu\text{m}$ , což umožňuje vytvářet aerosol. Produkce prachu je rozličná a dává vzniknout různým druhům prachů.

Domácí prach vzniká převážně odpadáváním odumřelých kožních buněk z povrchu těla. Na tomto prachu se pak živí hmyz a mikroorganismy, které vylučují látky způsobující alergie a astma. Nejlepší prevencí je dostatečná cirkulace vzduchu ve vnitřních prostorech.

Venkovní prach vzniká nedokonalým spalováním uhlovodíků, opotřebením pneumatik a brzd a z práce na staveništích. Není jednoduché se ho zbavit, jednou z možností je omezení vjezdu automobilů do měst, což je ovšem ne vždy možné a výhodné. Při dlouhodobém vystavení minerálnímu prachu může vzniknout pneumokonióza, nemoc způsobující zánět plic.

Pevné částice (PM10) jsou prachové částice, které jsou menší než 10  $\mu\text{m}$ . Nejvýznamnějším zdrojem jsou uhelné elektrárny a vznětové motory, pokud nejsou vybaveny filtrem pevných částic. Tyto částice jsou tak malé, že nejsou vyfiltrovány v horních cestách dýchacích, putují do plic a mohou vyvolat rakovinné bujení.



*Obr. 5 Kamionová doprava je jedním z hlavních lokálních zdrojů PM10 [10]*

### **1.3.3 BIOLOGICKÉ ŠKODLIVINY**

Mezi biologické škodliviny patří bakterie, viry a plísně. Jejich výskyt je největší v prostorech s velkým počtem lidí na malém místě, zejména v prostředcích hromadné dopravy. Zdravotní důsledky se liší podle jejich typu a významně závisí na aktuálním i dlouhodobém zdravotním stavu každého člověka.

Plísně se vytvářejí na stěnách při kondenzaci vlhkosti. Produkují spory, které mohou být pro lidský organismus nebezpečné.

Nejjednodušším opatřením je pokud možno prevence vzniku zdroje biologických škodlivin, dále je možno použít vhodných filtrů.

### **1.3.4 OSTATNÍ ŠKODLIVINY**

Ostatní škodliviny jsou nezařaditelné nebo špatně zařaditelné do jiných skupin. Jedná se jmenovitě o teplo a vodní páru. Nejsou to tedy vyloženě škodliviny, škodí pouze ve vysokém množství. Vhodná úroveň teploty a vlhkosti jsou hlavní požadavky pro tepelnou pohodu.

Vodní pára je coby produkt metabolismu spolu s CO<sub>2</sub> vhodným indikátorem ke spouštění větrání, jelikož vzniká v přítomnosti lidí bez ohledu na jejich činnost.

### 1.3.5 PŘÍPUSTNÉ HODNOTY ŠKODLIVIN

Přípustné hodnoty škodlivin stanoví Vyhláška ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb. ze dne 16. prosince 2002, kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb. V tab. 1 jsou uvedeny limitní hodinové koncentrace chemických ukazatelů a prachu.

Tab. 1 Přípustné hodnoty škodlivin [11]

ukazatelé	jednotka	limit
oxid dusičitý (NO <sub>2</sub> )	μg·m <sup>-3</sup>	100
frakce prachu PM10	μg·m <sup>-3</sup>	150
frakce prachu PM2,5	μg·m <sup>-3</sup>	80
oxid uhelnatý (CO)	μg·m <sup>-3</sup>	5000
ozón (O <sub>3</sub> )	μg·m <sup>-3</sup>	100
azbestová a minerální vlákna	počet vláken·m <sup>-3</sup>	1000
amoniak (NH <sub>3</sub> )	μg·m <sup>-3</sup>	200
benzen (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	μg·m <sup>-3</sup>	7
toluen (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub> )	μg·m <sup>-3</sup>	300
suma xylenu (C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	μg·m <sup>-3</sup>	200
styren (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> )	μg·m <sup>-3</sup>	40
etylbenzen (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )	μg·m <sup>-3</sup>	200
formaldehyd (HCHO)	μg·m <sup>-3</sup>	60
trichloretylen (C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub> )	μg·m <sup>-3</sup>	150
tetrachloretylen (C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> )	μg·m <sup>-3</sup>	150



## 2 VĚTRÁNÍ

### 2.1 CO JE TO VĚTRÁNÍ A K ČEMU SLOUŽÍ

Větráním rozumíme výměnu vnitřního vzduchu za vzduch venkovní. Jelikož je vnitřní prostředí uzavřené, nedochází samovolně k tak intenzivní výměně vzduchu a je proto nutné provést opatření a vynaložit určité úsilí k jeho výměně. Potřebné množství přiváděného vzduchu je dáno vzorcem

$$\dot{V}_p = \frac{\dot{S}}{k_i - k_o}, [12] \quad (2)$$

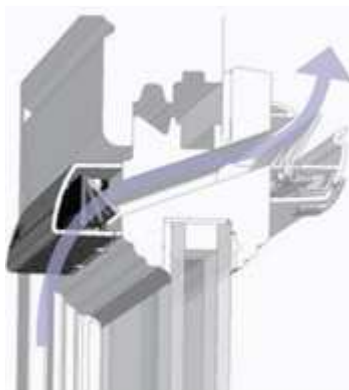
kde  $\dot{V}_p$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] je objemový tok přiváděného vzduchu,  
 $\dot{S}$  [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je množství vznikající škodliviny,  
 $k_i$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] je koncentrace škodliviny ve vnitřním prostředí,  
 $k_o$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] je koncentrace škodliviny ve vnějším prostředí.

Cílem větrání je udržovat obsah sledovaných škodlivin pod maximální přípustnou koncentrací, přičemž se zároveň do vnitřního prostoru dostává kyslík. Při větrání se mění veškerý vzduch, takže veškeré škodliviny vzniklé uvnitř odcházejí ven. Zároveň však můžou dovnitř vstupovat nežádoucí látky, zejména např. na rušné křižovatce. V takovém případě není samotné větrání vhodné a je třeba ho doplnit čištěním vzduchu, nejčastěji filtrací.

### 2.2 PŘIROZENÉ VĚTRÁNÍ

Přirozené větrání je nejstarší a nejobvyklejší způsob, jak zvýšit kvalitu vzduchu ve vnitřním prostředí. Není zapotřebí vynakládat žádné trvalé úsilí, obvykle stačí otevřít okna a větrání je započato. Existují dva možné principy větrání. První z nich je založen na větru, který vytváří přetlak na návětrné straně a podtlak na závětrné straně, čímž vyvolá proudění uvnitř budovy. Druhou možností je větrání na základě vztlakových sil, které vznikají při rozdílu vnitřní a vnější teploty.

Přirozené větrání je možné automatizovat pomocí speciálních vyústek pro přívod vzduchu, které dovedou regulovat tok vzduchu na základě vnitřní vlhkosti, případně na základě velikosti přetlaku vzduchu. Větrání pomocí těchto vyústek není příliš nákladné, zejména v zimním období se ale nemusí jednat o příliš vhodné řešení z důvodu tepelných ztrát. Jinou možností je mechanicky ovládat regulační prvky (klapky) a jimi regulovat tok vzduchu. V takovém případě už je třeba větrání řídit, systém řízení pak lze kombinovat s nuceným větráním.



Obr. 6 Vyústka pro přívod vzduchu Aereco s automatickou regulací průtoku vzduchu [13]

Výhodou přirozeného větrání je, že není třeba instalovat žádná nákladná zařízení. Výhodou je také spolehlivost takového větrání, jelikož jedinou opotřebovanou součástí jsou panty oken a dveří, případně regulační vyústky. Dále je možné větrat přesně tam, kde je zrovna potřeba a není nutné kvůli tomu předělávat projekt při stavbě domu, případně dům nákladně rekonstruovat.

Nevýhodou je, že se obvykle o veškeré větrání musíme starat sami. Další nevýhodou je ne vždy optimální účinek větrání, zejména při větrání pouze jedním oknem. Pokud chceme i v takovém případě dosáhnout dostatečné výměny vzduchu, musíme větrat déle. Delší větrání s sebou ovšem přináší problém v podobě vyšších tepelných ztrát.

### 2.3 NUCENÉ VĚTRÁNÍ

Nucené větrání je modernějším přístupem k výměně vzduchu. Návrh větrání je v ideálním případě už součástí stavebního plánu budovy. Při nuceném větrání se výměny vzduchu dosahuje pomocí ventilátorů, které jsou umístěny na místech vhodných z hlediska proudění vzduchu.

Nevýhodou nuceného větrání jsou zvýšené náklady na zavedení systému a nutnost pohonu ventilátorů. Spotřeba energie přitom roste s třetí mocninou otáček, zatímco objemový průtok vzduchu roste lineárně. Tato spotřeba je však obvykle zanedbatelná oproti tepelným ztrátám. [14]

Výhodou je možnost samočinného chodu a nezávislost na počasí. Velkou výhodou nuceného větrání je také možnost jeho regulace v čase, ať už podle přednastaveného programu nebo podle aktuálních podmínek.





*Obr. 7 Ventilátor Avet pro připojení do vzduchotechnického potrubí [15]*

## 2.4 FILTRACE A ČIŠTĚNÍ VZDUCHU

Je třeba rozlišovat mezi větráním, filtrací a čištěním vzduchu. Zatímco větráním se nežádoucí škodliviny vypustí do vnějšího prostředí, při čištění se zcela odstraní z ovzduší. Čištění se používá zejména pro redukci škodlivin vstupujících do vnitřních prostor, zejména v blízkosti vnějšího zdroje znečištění, a je obvykle kombinováno s nuceným větráním. Čištění je však také často nutno použít při práci se škodlivými látkami, aby se omezil jejich škodlivý vliv po odvodu do ovzduší. Nejčastější formou čištění je filtrace, obvykle pomocí kapsových filtrů na přívodu vzduchu.



*Obr. 8 Kapsový filtr společnosti Filtration Group [16]*

## 2.5 TEPELNÉ ZTRÁTY

Při každém větrání dochází kromě výměny plynů i k výměně jejich vnitřní energie. Tato energie odpovídá tepelnému pohybu částic, dochází tedy k výměně tepla mezi vnitřním a vnějším prostředím. Tok tepla odpovídá gradientu teploty, vždy je tendence vyrovnat vnitřní a vnější teplotu. Změna teploty při větrání vychází z rovnice

$$\dot{V}_p = \frac{\dot{Q}}{\rho \cdot c_p \cdot (t_o - t_p)}, [12] \quad (3)$$

kde	$\dot{Q}$	[W]	je tepelná zátěž citelným teplem,
	$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	je hustota přiváděného vzduchu,
	$c_p$	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	je měrná tepelná kapacita vzduchu,
	$t_p$	[°C]	je teplota přiváděného vzduchu,
	$t_o$	[°C]	je teplota odváděného vzduchu.

Pokud předpokládáme, že uvnitř máme optimální teplotu, pak jakoukoli její změnu můžeme považovat za negativní. Proto je potřeba větrání řídit, ať už manuálně, nebo samočinně, neboť veškeré větrání s sebou přináší tepelné ztráty.

Pro omezení tepelných ztrát je možné využít zpětné získávání tepla (ZZT). Při ZZT je zvenčí přiváděný čerstvý vzduch ve výměníku ohříván odváděným vnitřním vzduchem. Použití protiproudého výměníku umožní získat teplotu velmi blízkou teplotě odváděného vzduchu. Dobré výměníky mohou dosahovat účinnosti až 90 %, čímž výrazně klesají tepelné ztráty. Výrazně se výhody ZZT projeví v dobře tepelně izolovaných budovách, kde tepelné ztráty větráním tvoří významný podíl celkových tepelných ztrát. Podobně lze ZZT využít i v případě, že máme klimatizovanou budovu a potřebujeme uvnitř udržet chlad. V takovém případě je tepelný tok ve výměníku obrácený a ve výsledku snižujeme spotřebu klimatizační jednotky.

### 3 SNÍMAČE ŠKODLIVIN

Snímače škodlivin nám dávají informaci o obsahu škodlivin v daném prostoru. Jejich užití může spočívat v hlídání koncentrace vysoce nebezpečných škodlivin a sepnutí alarmu, k optimalizaci odsávání zplodin z různých technologických operací i například k spínání a regulaci ventilace. Lze také s jejich pomocí limitovat vystavení pracovníků nebezpečné látce po určitou dobu a tím efektivně zajišťovat jejich pravidelné střídání bez ohrožení jejich zdraví.

Existuje mnoho druhů snímačů, každý se hodí pro určité typy škodlivin, pro určité koncentrace a pro určité aplikace. Rozhodujícími parametry jsou cena, typy zjišťovaných škodlivin, citlivost, přesnost a selektivita. Dnes dostupné přístroje často nabízejí kombinaci různých snímačů škodlivin s měřením teploty a vlhkosti. Zde zmíněné měřicí přístroje jsou ty nejpoužívanější a nejperspektivnější.

#### 3.1 FOTOIONIZAČNÍ DETEKTORY

Fotoionizační detektory (PID – photoionization detector) fungují na principu ionizace plynu. Ultrafialové záření vytvářené uvnitř detektoru ionizuje molekuly plynů, které mají nižší ionizační potenciál než je energie vyzařovaných UV fotonů. Tím je plyn elektricky nabit a vytváří elektrický proud, který je po zesílení měřen ampérmetrem.

Výhodou fotoionizačního detektoru je vysoká citlivost (od jednotek ppb po desítky tisíc ppm) a nízká cena. Další výhodou je nedestruktivní princip měření, takže je možné plyn dále měřit jiným typem detektoru a zpřesnit tak výsledky.

Hlavní nevýhodou je v podstatě nulová selektivita. Záření ionizuje všechny plyny s nižším ionizačním potenciálem, bez ohledu na jejich škodlivost. Dozvíme se tedy pouze součet obsahů všech plynů s nižším ionizačním potenciálem. Z toho důvodu je vhodné použít další detektor, který nám blíže určí složení plynu. Pokud ovšem předpokládáme výskyt pouze jednoho plynu nebo jedné skupiny plynů, je tento detektor dostatečný.

Další nevýhodou je, že energie fotonů musí být nižší než ionizační potenciál významných složek vzduchu (12,1 eV pro kyslík). Proto nelze takto detekovat například oxid uhličitý, vodní páru, vodík a metan, jejichž ionizační potenciál je vyšší. [17]

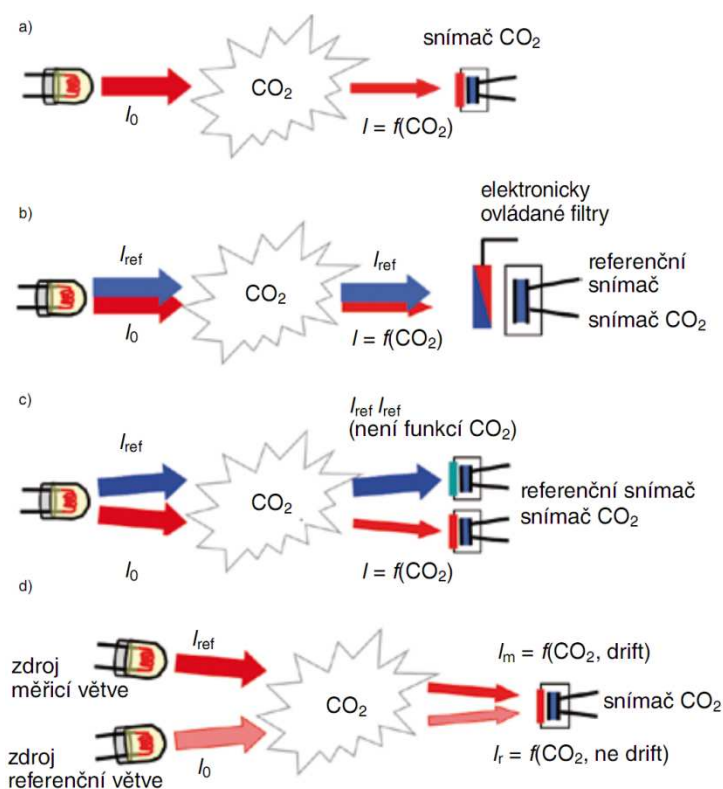
Tento typ detektoru je zejména vhodný pro detekci organických sloučenin, k čemuž ho předurčuje vysoká citlivost. Vzhledem k nízké ceně ho lze použít na více místech zároveň a pokrýt tak například výrobní halu, kde hrozí ohrožení rozpouštědly. Před nákupem konkrétního detektoru je třeba si rozmyslet, co chceme měřit, a podle toho vybrat typ UV zdroje. Čím je vyšší energie fotonů, tím je širší záběr možných škodlivin, ale hůře se určuje, které škodliviny jsme skutečně naměřili.

### 3.2 INFRAČERVENÉ SNÍMAČE

Infračervené (NDIR – nondispersive infrared) snímače fungují na principu absorpce elektromagnetického záření. Infračervené záření prochází baňkou s plynem a přes spektrální filtr dopadá na infračervený snímač. Z poklesu množství záření dopadlého na snímač pak lze určit koncentraci plynu v baňce.

Výhodou infračervených snímačů je jejich schopnost neomylně identifikovat koncentraci oxidu uhličitého. V tomto ohledu jsou lepší než polovodičové snímače, u kterých může docházet k interferencím s jinými plyny.

Nevýhodou je stárnutí zdroje infračerveného záření (obr. 9a). Pro kompenzaci stárnutí lze použít referenční filtr, který ověří svítivost zdroje na jiné vlnové délce (obr. 9b). Novějšími metodami kompenzace jsou použití druhého snímače s jiným filtrem (obr. 9c), nebo nejnověji použití dvou zdrojů, přičemž jeden z nich se používá pro občasné zjištění degradace hlavního zdroje a následnou kalibraci (obr. 9d).



Obr. 9 Kompenzace infračervených snímačů  $\text{CO}_2$  [18]

Další nevýhodou je riziko znečištění optiky prachem nebo mlhou, to ovšem přístroje dokážou rozpoznat a na problém upozornit. Dondávna byla nevýhodou také vyšší cena a větší rozměry. V poslední době však ceny a rozměry infračervených snímačů výrazně klesly a tyto přístroje se stávají dostupnými. [18]

Infračervené snímače se nejčastěji používají pro měření koncentrace oxidu uhličitého, je možné je také použít pro detekci hořlavých plynů. V poslední době se jedná o progresivní měřicí přístroje, které se velmi zlepšily a zlevnily. Lze je proto použít i v domácích aplikacích, a jejich větší dostupnost ještě urychlí rozvoj jejich možností.

### 3.3 PLAMENO-IONIZAČNÍ DETEKTOR

Plameno-ionizační detektor (FID – flame ionization detector) pracuje na principu detekce iontů vzniklých hořením měřeného plynu, vodíku a okysličovadla. V produktech hoření této směsi jsou zjišťovány koncentrace iontů zoxidovaného uhlíku, které jsou vyhodnoceny a převedeny na koncentraci plynů.

Tyto detektory jsou citlivé pouze na uhlovodíky, což může být v různých případech výhoda i nevýhoda. Stejně tak ne vždy výhodná je schopnost detekovat metan, jelikož ten může ovlivňovat měření jiného plynu. Nespornou nevýhodou je, že tento detektor změní složení měřeného plynu a ten už nemůže být dále měřen. Další nevýhodou je nutnost použití vodíku, jehož výroba a přeprava může být v určitých případech problematická. Proto nejsou FID příliš vhodné pro všeobecné použití. [19]

Nejobvyklejším použitím plameno-ionizačních detektorů jsou skládky, kde je jimi analyzováno množství a složení unikajících plynů. Plameno-ionizační detektory mají mírně odlišný záběr škodlivin než PID detektory, které jsou pro měření skládkových plynů nevhodné. V běžných aplikacích jsou však používanější PID detektory. [20]

### 3.4 KATALYTICKÉ SPALOVACÍ SNÍMAČE HOŘLAVÝCH PLYNŮ - PELISTORY

Katalytické spalovací snímače hořlavých plynů, nazývané též pelistory (z kombinace slov pellet a resistor), využívají hoření plynů ke změně teploty. V prostoru s plynem jsou dva odporové teploměry, obvykle platinové. Oba teploměry jsou zahřívány, přičemž jeden z nich je pokryt katalyzátorem usnadňujícím spalování, zatímco u druhého je spalování znemožněno. Zvýšeným zahříváním jednoho teploměru vlivem hoření měřených plynů vzniká rozdíl teplot, který je pak převeden na koncentraci hořlavých plynů.

Výhodou těchto snímačů je spolehlivá detekce hořlavých plynů, zcela nezávisle na jejich chemickém složení. Díky použití katalyzátoru je možné zachytit ještě poměrně bezpečnou koncentraci, čímž se minimalizuje riziko.

Nevýhodou je potřeba kyslíku a destruktivní metoda měření. Dále může dojít ke kontaminaci snímače katalyzátorovým jedem.

Tyto snímače se používají výhradně a univerzálně pro různé hořlavé plyny. [21]

### 3.5 POLOVODIČOVÉ

Polovodičové (MOS – metal oxide semiconductor) snímače pracují na principu změny elektrického odporu v přítomnosti plynu. Nejčastěji se používá oxid cíničitý ( $\text{SnO}_2$ ), zahřátý na teplotu okolo 400 °C. Elektrická vodivost  $\text{SnO}_2$  roste v přítomnosti kyslíku, ale klesá v přítomnosti hořlavých plynů. Změna odporu pak slouží k určení složení vzduchu.

Nejobvyklejší použití těchto snímačů je pro detekci oxidu uhelnatého v domácnostech, kde se používá pro svou spolehlivost. Dnes už však často bývá nahrazován elektrochemickým snímačem. [21]

### 3.6 ELEKTROCHEMICKÝ SNÍMAČ

Elektrochemický snímač pracuje na principu palivového článku. Měřený plyn procházející článkem je zoxidován kyslíkem na jedné elektrodě a na druhé elektrodě je spotřebován kyslík. Vzniklý proud mezi elektrodami je měřen.

Tento snímač se v poslední době začíná hodně používat pro detekci oxidu uhelnatého, oxidů dusíku nebo chloru. Je přesný a nespotřebuje mnoho elektriny. [21]

### 3.7 TEPelnĚ VODIVOSTNÍ SNÍMAČ

Tepelně vodivostní snímač pracuje na principu různé tepelné vodivosti různých plynů. Měřená směs plynů prochází přes zahříváný odporový teploměr. Čím je vyšší vodivost směsi, tím nižší je výsledná teplota teploměru. Tato se pak porovnává s teplotou v druhé části snímače, kde se nachází referenční plyn. Z rozdílu teplot lze určit tepelnou vodivost směsi a její složení.

Tento typ snímače je univerzální, hodí se pro určování významných složek vzduchu i pro zjišťování různých škodlivin. Nevýhodou je určitá nejistota při určování složení směsi, jelikož při dané vodivosti může existovat mnoho možných kombinací plynů. [22]

## 4 ŘÍZENÍ VĚTRÁNÍ

### 4.1 ZPŮSOBY ŘÍZENÍ

Pro každé větrání je třeba rozhodnout, kdy se toto větrání bude uskutečňovat. Existují dva hlavní způsoby – manuální řízení a automatické řízení.

Nejjednodušším způsobem řízení je **manuální řízení**, ovládané člověkem. Člověk sám si zapne větrání ve chvíli, kdy mu to přijde vhodné. To je na jednu stranu výhodné, jelikož si může větrat podle svého rozhodnutí, na druhou stranu ale větrání často spustí příliš pozdě, až když začne pociťovat únavu z nedostatku čerstvého vzduchu.

Pokročilejším způsobem řízení je **automatické řízení**. To může být ovládáno přednastaveným programem nebo na základě koncentrace škodlivin ve vzduchu.

Řízení větrání přednastaveným programem nám umožňuje řídit větrání na základě předpokládané obsazenosti místnosti v čase. Člověk se tak nemusí namáhat se spouštěním větrání a místnost je vyvětraná včas, před vznikem únavy. Nevýhodou je, že program nedokáže rozpoznat změny v předpokládané obsazenosti, například poradu v jinak prázdné zasedací místnosti, nebo naopak vylidněné kanceláře během prázdnin. V prvním případě je nutné ručně zvolit intenzivnější větrání, v druhém případě je vhodné větrání vypnout, aby se zamezilo plýtvání energií.



*Obr. 10 Program nechá tuto kancelář větrat, i když nikdo nebude přítomen [23]*

Nejvýhodnější metodou je automatické řízení na základě koncentrace škodlivin ve vzduchu. Při tomto způsobu řízení se větrání zahájí ve chvíli, kdy koncentrace některé ze sledovaných škodlivin přesáhne povolenou mez. Nikdy tak není potřeba zasahovat do řízení větrání a přitom je vždy zaručena potřebná kvalita vzduchu. Pokud není potřeba větrat, dochází k úspoře energie. Jedinou nevýhodou je potřeba snímačů, které byly donedávna cenově nedostupné. Dnes už je možné pořídit si například kombinaci teploměru, vlhkoměru a snímače CO<sub>2</sub>, která dokáže udržet příjemné vnitřní prostředí.

## 4.2 ŘÍDÍCÍ STRATEGIE

Pokud už máme informaci o tom, zda chceme větrat, pak je třeba určit intenzitu větrání. Existují v podstatě dva způsoby řízení.

Nejčastější je tzv. dvoustavové (vypnuto – zapnuto) řízení. V případě dvoustavového řízení pouze rozhodujeme, zda se má nebo nemá větrat, větrání se vždy spustí na plný výkon. Takovéto řízení se uplatní zejména u ventilátorů. Ventilátory bez možnosti změny otáček byly donedávna jediné finančně dostupné ventilátory a dodnes jsou levnější než ventilátory s plynulou změnou otáček. Pro tento způsob řízení je nezbytné použít hystereze, kdy k sepnutí dochází při jiné koncentraci než k vypnutí. Tím se zamezí neustálému zapínání a vypínání ventilátoru, které by zbytečně zatěžovalo motor a elektrickou síť, způsobovalo zbytečný hluk a přitom nepodávalo dobré výsledky. Frekvence zapínání a vypínání je vyšší při menším rozsahu hystereze.

Další možností je spojitě řízení, nejčastěji pomocí PID regulátoru. V takovém případě můžeme přesně určit intenzitu výměny vzduchu, která by měla být funkcí koncentrace škodliviny. Pro spojitě řízení otáček ventilátoru potřebujeme motor s plynulou změnou otáček, dnes nejčastěji asynchronní motor s měničem frekvence nebo stejnosměrný motor s elektronickou komutací. Dnes už jsou tyto ventilátory finančně dostupné a umožňují ušetřit náklady na elektrickou energii, jelikož spotřeba ventilátoru roste se třetí mocninou otáček, zatímco objemový průtok vzduchu je otáčkám přímo úměrný. Také je možné spojitě řídit směšovací díl u klimatizace. Tím se optimalizuje recirkulace vzduchu a minimalizují tepelné ztráty.



Obr. 11 Znázornění funkce směšování a směšovací díl společnosti Remak [24]



## 5 ILUSTRATIVNÍ PŘÍPAD

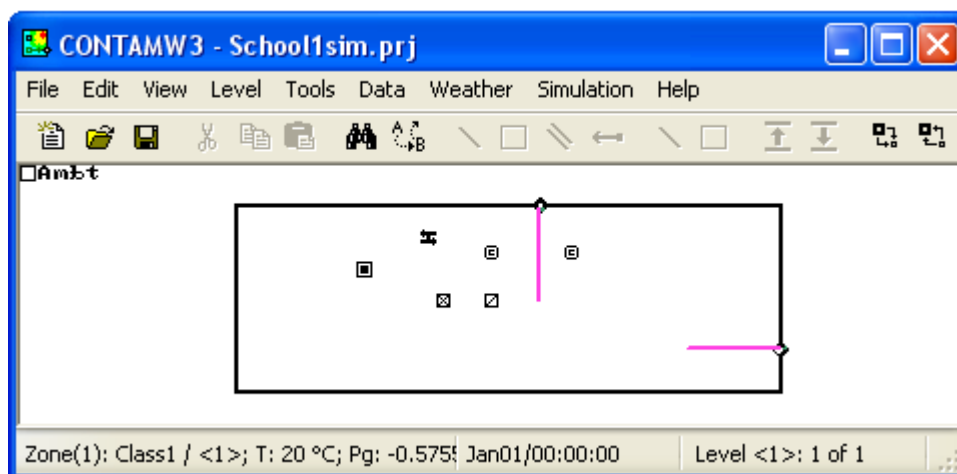
### 5.1 ZADÁNÍ

Pro ilustraci byla zvolena školní učebna. Rozměry učebny jsou (11 x 6 x 3,2) m, objem vzduchu 211,2 m<sup>3</sup>, kapacita učebny 30 studentů + učitel. Byla uvažována výměna vzduchu infiltrací 0,1 h<sup>-1</sup>, produkce CO<sub>2</sub> 5 ml·s<sup>-1</sup>·os<sup>-1</sup>.

Dle Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, musí být minimální množství venkovního vzduchu přiváděného na pracoviště 50 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> na zaměstnance vykonávajícího práci vsedě. Stejné množství přiváděného vzduchu stanoví i Vyhláška Ministerstva zdravotnictví 107/2001 o hygienických požadavcích na stravovací služby. Při 31 osobách je tedy požadované množství vzduchu 1550 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>. [25][26]

Vyučování probíhá od pondělí do čtvrtka od 8:00 do 15:00, v pátek od 8:00 do 13:00. V úterý od 10:00 do 11:00 mají studenti hodinu tělesné výchovy a učebna je tudíž prázdná. Ve středu se psala písemka z matematiky a polovina studentů se proto raději vůbec nedostavila. Ve čtvrtek výjimečně od 14:00 do 15:00 probíhali třídní schůzky, na které se dostavilo 40 rodičů. Pro řízení větrání byly zvoleny dva způsoby – přednastaveným programem a dvoustavové řízení na základě obsahu CO<sub>2</sub> v učebně. V praxi často nastává i větrání manuálně ovládané člověkem (otevření okna), to by ale bylo náročné nasimulovat. Navíc v zimním období v tomto případě dochází ke značným tepelným ztrátám a ne každý větrání studeným vzduchem ocení.

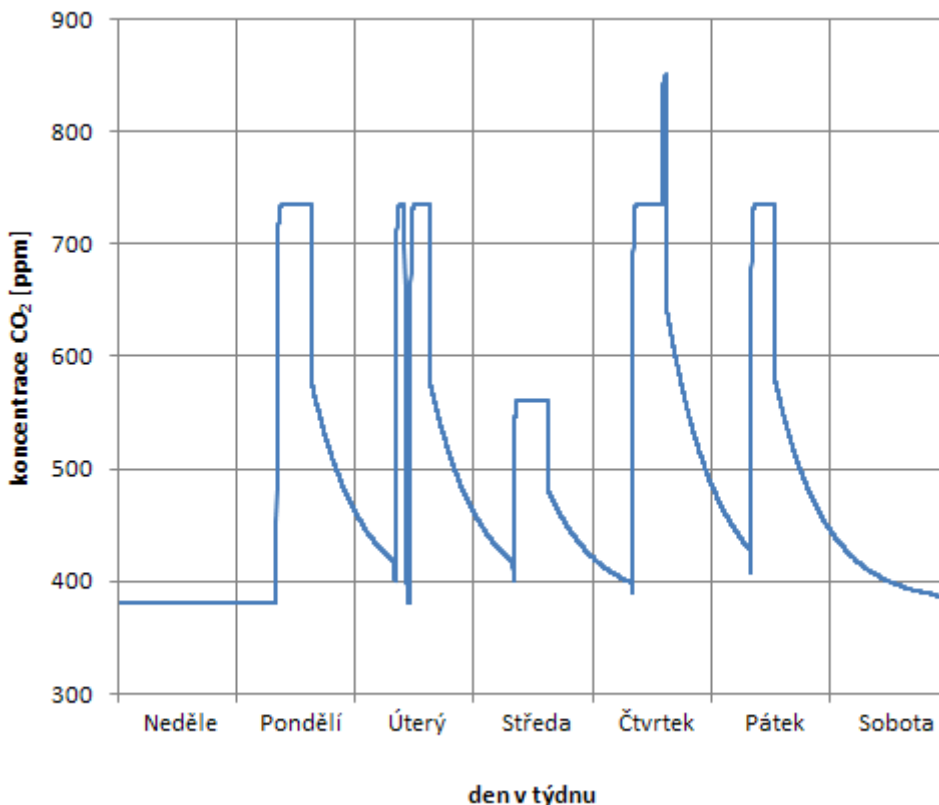
Simulace byla provedena v programu Contam. Jedná se o volně stažitelný software vytvořený americkým institutem NIST (National Institute of Standards and Technology). Tento program umožňuje vytvářet simulaci proudění vzduchu a simulovat změnu teploty a koncentrace různých škodlivin v budovách. Krok simulace byl nastaven na 1 minutu, což byl kompromis mezi přesností a výpočetními možnostmi počítače. [27]



Obr. 12 Rozhraní programu Contam s připravenou simulací řízení větrání

## 5.2 ŘÍZENÍ PŘEDNASTAVENÝM PROGRAMEM

Pro řízení větrání byl zvolen program, který ve všední den sepne ventilátor v 7:55 a vypne v 15:05, v pátek v 13:05. Průtok vzduchu ventilátorem byl  $1550 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

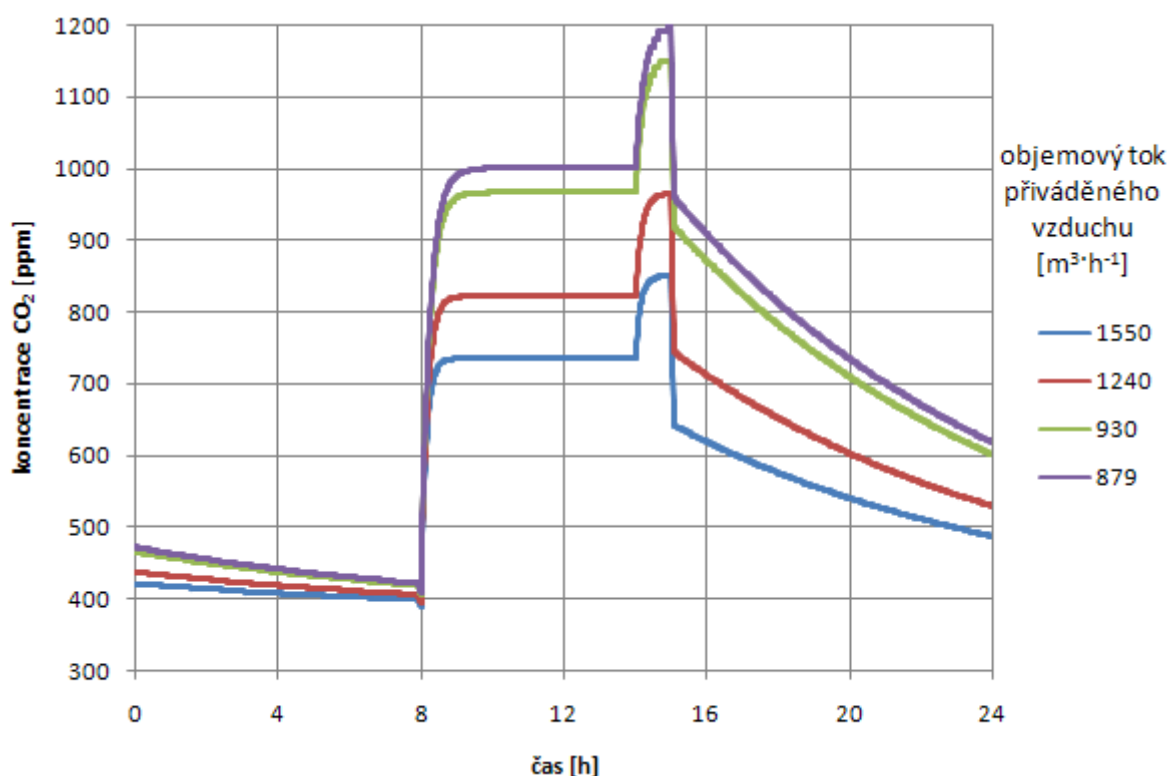


Obr. 13 Koncentrace CO<sub>2</sub> v průběhu týdne při větrání řízeném programem, průtok  $1550 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Z grafu je patrné, že koncentrace CO<sub>2</sub> dosáhla během výuky nejvýše úrovně 735 ppm. To je poměrně nízká hodnota, za přípustnou koncentraci se běžně považuje 1000 ppm. Z tohoto pohledu se tedy může zdát větrání přehnané. Během rodičovských schůzek se však koncentrace zvýšila na 850 ppm. Zde je vidět, že nastavená intenzita větrání může dobře sloužit jako tolerance pro občasné navýšení počtu lidí nad obvyklý stav.

Během hodiny tělesné výchovy se naopak místnost vyvětrala natolik, že se v ní dokonce 4 minuty před 11. hodinou dosáhlo koncentrace 380 ppm, tedy stejné jako venku. Takové větrání není příliš účelné, neboť dochází k výměně téměř čistého vzduchu. Stejně tak větrání při poloviční obsazenosti snížilo koncentraci na zbytečně nízkou hodnotu.

Pro další ilustraci byly zvoleny různé objemové průtoky v průběhu čtvrtka, kdy probíhají třídní schůzky a dojde ke zvýšené produkci CO<sub>2</sub>. Jedná se o požadovaných  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{os}^{-1}$ , dále pro porovnání  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{os}^{-1}$  a  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{os}^{-1}$  a nakonec takový průtok, který uvnitř při běžném vyučování zajistí koncentraci přesně 1000 ppm.



Obr. 14 Koncentrace  $\text{CO}_2$  v průběhu čtvrtka při větrání řízeném programem

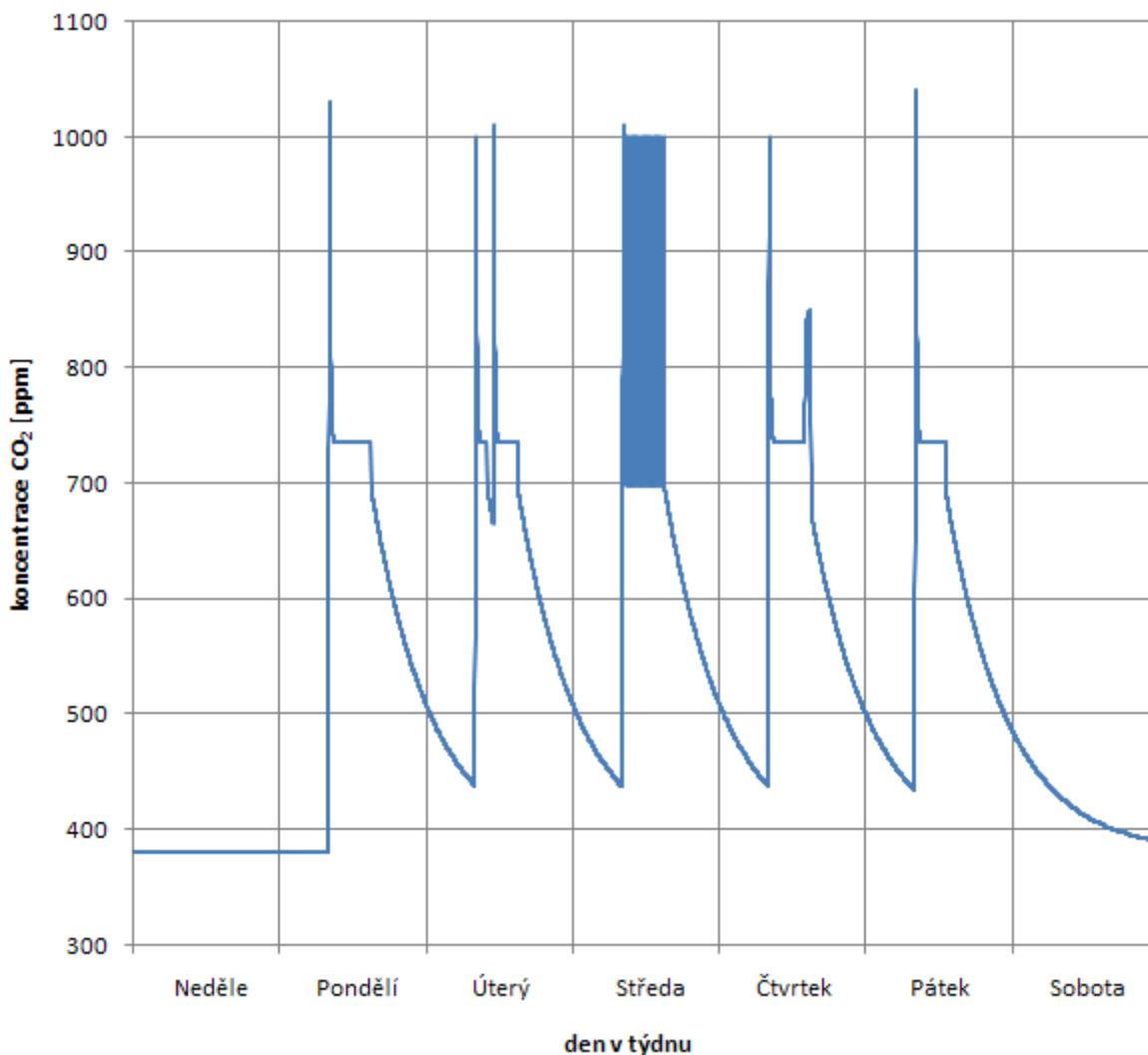
Z tohoto grafu je zřejmé, že pro dostatečné vyvětrání (na koncentraci 1000 ppm) byl za běžných podmínek potřebný objemový tok ventilátoru  $879 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , tedy  $28,35 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{os}^{-1}$ . Po přičtení infiltrace vzduchu, která v přepočtu činila  $0,68 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{os}^{-1}$ , byl celkový průtok  $29 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{os}^{-1}$ .

V praxi by se takovýto ventilátor nepoužil, jelikož by nedokázal vykrýt případné špičky při větším počtu osob nebo při zvýšené fyzické aktivitě během hodiny. Průtok vzduchu  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{os}^{-1}$  se zdá být jako rozumný kompromis, jelikož dokázal v našem případě i při zvýšené produkci oxidu uhličitého udržet jeho koncentraci pod 1000 ppm.

Celkově lze prohlásit, že vhodně nastavený program se dokáže o větrání dobře postarat. Uvedený příklad školní třídy je ovšem zjednodušený a poměrně jednoduchý na navržení programu. V praxi se lze setkat s prostory s mnohem komplikovanějším výskytem osob, u kterých by tento program musel být nastaven na maximální očekávaný počet osob. Mezi tyto prostory lze zařadit např. čekárny, vagony vlaku, restaurace nebo obchody.

### 5.3 ŘÍZENÍ NA ZÁKLADĚ OBSAHU CO<sub>2</sub> V UČEBNĚ

Pro řízení větrání byl zvolen program, který sepne ventilátor při koncentraci CO<sub>2</sub> 1000 ppm a vypne při 700 ppm. Průtok vzduchu ventilátorem při jeho běhu byl 1550 m<sup>3</sup>·hod<sup>-1</sup>.

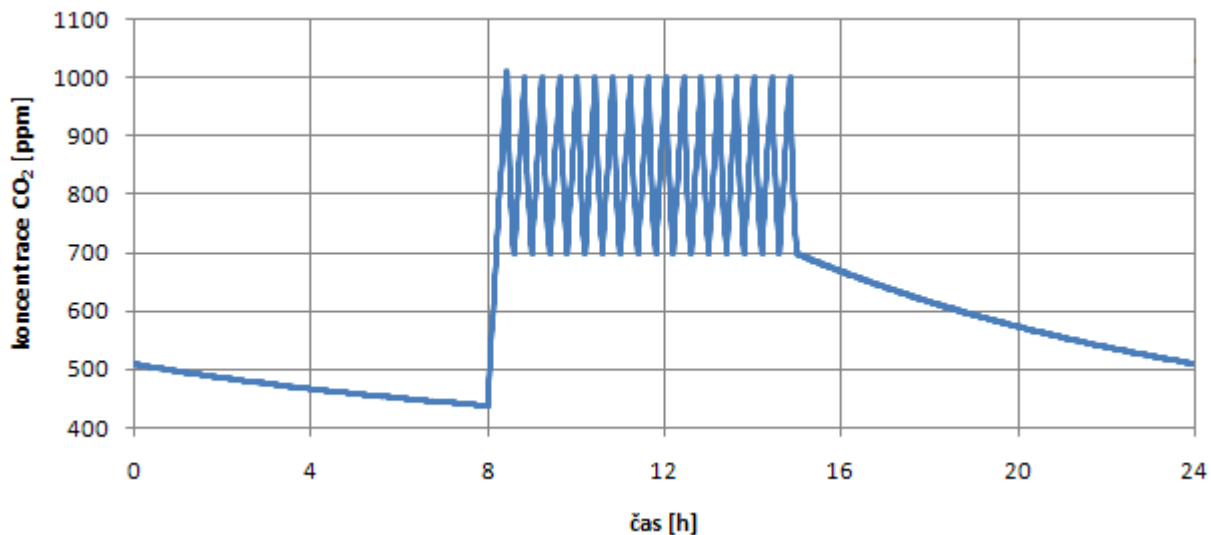


Obr. 15 Koncentrace CO<sub>2</sub> v průběhu týdne při větrání řízeném koncentrací CO<sub>2</sub>

Z grafu lze vidět, že na začátku každého dne vzrostla koncentrace nad úroveň 1000 ppm. V tu chvíli sepnul ventilátor a rychle snížil koncentraci na 735 ppm, stejně jako v předchozím případě. Na konci každého dne se ventilátor vypnul při koncentraci 700 ppm.

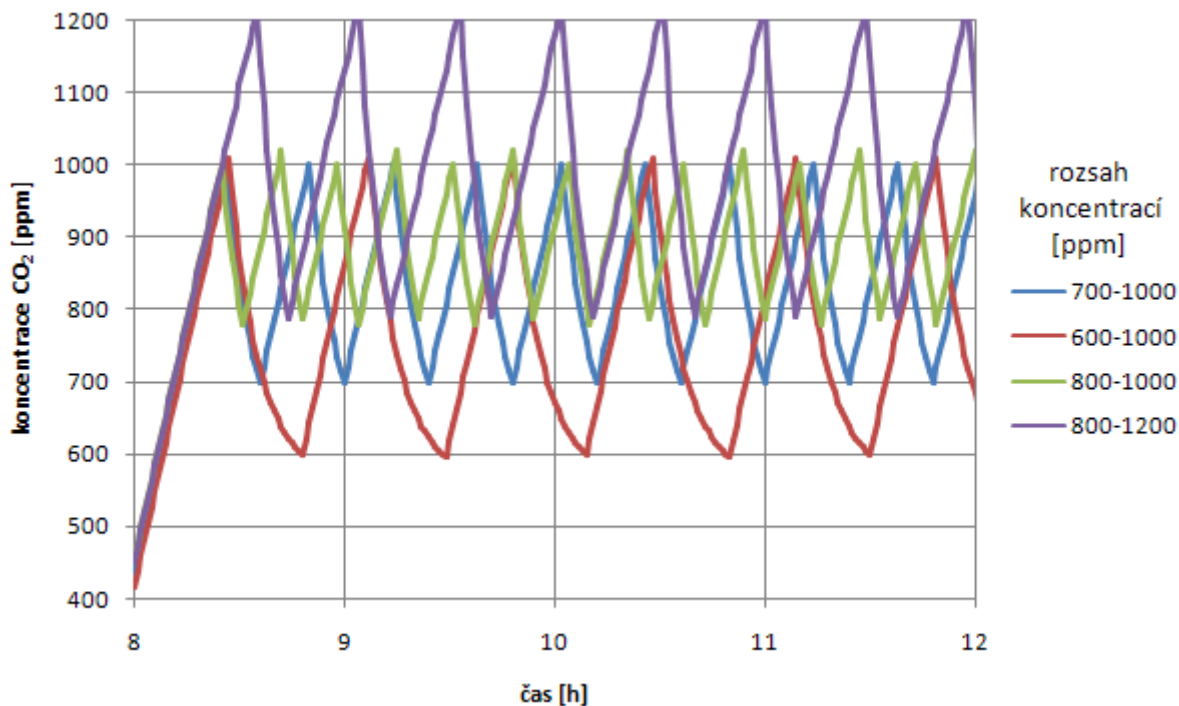
Během úterý, při hodině tělesné výchovy, se ventilátor také zastavil při koncentraci 700 ppm, na rozdíl od řízení programem, který ponechal ventilátor v chodu. Ušetřila se tak hodina chodu ventilátoru. Během čtvrtečních třídních schůzek se ventilátor choval stejně jako při řízení programem, jelikož byl tou dobou spuštěn.

Nejzajímavěji dopadla středa. Jelikož ventilátor měl dostatečný tok pro snížení koncentrace  $\text{CO}_2$  pod 700 ppm, docházelo v průběhu dne k neustálému vypínání a zapínání ventilátoru. Jeho průběh je dobře vidět na následujícím grafu.



Obr. 16 Koncentrace  $\text{CO}_2$  v průběhu středy při větrání řízeném  $\text{CO}_2$

Ventilátor byl vždy střídavě 14 minut spuštěn a 10 minut vypnut. Tím klesla celková doba větrání na dvě pětiny. Průběh větrání se samozřejmě změní, pokud se změní krajní hodnoty koncentrací  $\text{CO}_2$ . Na následujícím grafu je vidět časový úsek ve středu od 8 do 12 hodin pro různá nastavení.



Obr. 17 Koncentrace  $\text{CO}_2$  v průběhu středy při větrání řízeném  $\text{CO}_2$  při různých krajních hodnotách

Z grafu je vidět, že menší rozsah koncentrací způsobí častější spínání a vypínání ventilátoru. V případě rozsahu (800-1000) ppm byl ventilátor 6 minut spuštěn a 10 minut vypnut. Naproti tomu při rozsahu (600-1000) ppm byl ventilátor 21 minut spuštěn a 19 minut vypnut.

Dále je vidět, že při vyšších koncentracích je větší podíl času ventilátor vypnut. Při rozsahu (800-1200) ppm je ventilátor 9 minut spuštěn a 20 minut vypnut, běží tedy pouze třetinu celkového času. Oproti tomu při koncentraci (600-1000) ppm byla doba chodu téměř stejná jako doba klidu. Toto je dobré vzít v úvahu a je to jeden z důvodů, proč se horní hranice koncentrace volí nejvyšší přípustná.

#### 5.4 VYHODNOCENÍ

Pro uvedený příklad je zřejmé, že i předem nastavený program se dokáže o kvalitní větrání dobře postarat. Někdy se sice může stát, že poskytuje zbytečně velké množství vzduchu, jindy ale může posloužit jako pojistka před přílišným nárůstem koncentrace CO<sub>2</sub>. Je však důležité vhodně nastavit průtok ventilátoru. Vyhlášky sice nařizují minimálně 50 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>·os<sup>-1</sup>, simulace ale ukázala, že 40 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>·os<sup>-1</sup> je dostatečný průtok.

Při řízení na základě koncentrace CO<sub>2</sub> je důležité vhodně nastavit krajní hodnoty koncentrací. Pokud nám nevadí časté spínání a vypínání ventilátoru, pak je možné nastavit dolní koncentraci vysoko, třeba 800 ppm. Výhodou pak je, že ventilátor běží pouze třetinu celkového času. V případě, kdy je časté spínání vysoce nežádoucí, se naopak může koncentrace nastavit tak nízko, že se ventilátor vypne až po opuštění místnosti. V tomto případě však může ventilátor běžet zbytečně, navíc může docházet k vysokým tepelným ztrátám.

Pokud máme k dispozici ventilátor s plynule měnitelnými otáčkami, pak je vhodné řídit jej spojitě. Nedochozí k neustálému spouštění a vypínání, koncentrace se příliš nemění a ventilátor je tak optimálně využit. V uvedeném případě nebyl tento případ použit, jelikož byl uvažován ventilátor bez plynule měnitelných otáček a navíc by bylo složité vytvořit vhodný algoritmus regulace v programu CONTAM.

## ZÁVĚR

Pro optimální větrání je třeba si nejdříve uvědomit, jaké prostředí chceme větrat. Z toho určíme hlavní větranou škodlivinu. Ačkoli nejčastěji větráme kvůli vysoké koncentraci oxidu uhličitého, v průmyslu se často pracuje s jinými látkami, které jsou nebezpečné dříve, než CO<sub>2</sub>. Může se jednat například o různé těkavé látky nebo oxid uhelnatý.

Pokud známe sledovanou škodlivinu, pak je třeba vybrat vhodný snímač. Rozhodujícím parametrem by určitě měla být přesnost a citlivost, velice důležitá je ale samozřejmě i cena. V případě nízké ceny je možné pořídit si více snímačů a rozmístit je pro přesnější informaci o škodlivině v různých místech.

Dále je nutné zvolit ventilátor. Jeho objemový průtok musí být dostatečný pro vyvětrání místnosti od sledované škodliviny, a přitom bychom neměli volit příliš výkonný ventilátor, který by byl drahý a přiváděl nadměrné množství větracího vzduchu. Je potřeba si rozmyslet, jestli chceme ventilátor s plynulou změnou otáček. Ten je sice dražší, ovšem umožní daleko lépe optimalizovat větrání a může se snížit spotřeba elektrické energie.

Pokud chceme použít přednastavený program, musíme si udělat dobrou představu o průběhu vzniku škodliviny v prostoru. Obvykle je potřeba tuto hodnotu poněkud nadhodnotit, aby nedošlo k přílišnému navýšení koncentrace škodliviny v případné špičce produkce. Řízení programem není vždy vhodné, jelikož v některých prostorech je výskyt osob natolik proměnlivý, že nelze dostatečně postihnout.

V takovém případě je vysoce výhodné použít řízení na základě obsahu škodliviny v ovzduší. Důležité je nastavení limitní koncentrace škodliviny, a to jak horní, tak dolní meze. První možností je dvoustavové řízení. Meze můžeme navrhnout pro spíše časté spínání a vypínání, nebo spíše pro dlouhodobé větrání. Mezi těmito možnostmi neexistuje žádná hranice, záleží pouze na konkrétním návrhu. Druhou možností je spojité řízení. Zde je důležitý vhodný návrh PID regulátoru. V kombinaci s vhodným ventilátorem pak můžeme dosáhnout skvělých výsledků.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Apprendre - L'oxygène* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.uel.education.fr/consultation/reference/chimie/elements/p1/apprendre/gcb.elp.fa.201.a2/content/access.htm#sommaire>>.
- [2] *Trends in Carbon Dioxide* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo>>.
- [3] *Carbon Monoxide* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.epa.gov/iaq/co.html>>
- [4] *MOPITT Data Plots – Monthly* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <[http://www.acd.ucar.edu/mopitt/MOPITT/data/plots/maps\\_mon.html](http://www.acd.ucar.edu/mopitt/MOPITT/data/plots/maps_mon.html)>
- [5] *Carbon Monoxide Levels – How Much is too Much?* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.carbon-monoxide-poisoning.com/article1-co-levels.html>>
- [6] *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.carbon-monoxide-poisoning.com/article1-co-levels.html>>
- [7] *Bucket List Network – Bucket-list-ideas Directory* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://bucketlistnetwork.com/bucket-list-ideas/?page=4>>
- [8] *Nudat 2* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>>
- [9] *Geologická prognózní mapa radonového rizika* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.suro.cz/cz/prirodnioz/rnmapy/geolprogncr>>
- [10] *Diesel smoke* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.wikinfo.org/upload/7/79/Diesel-smoke.jpg>>
- [11] Česká republika. Vyhláška ministerstva zdravotnictví ze dne 16. prosince 2002, kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí obytných místností některých staveb. 6/2003 Sb.
- [12] *Kurz: technika prostředí* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <<https://www.vutbr.cz/elearning/course/view.php?id=100130>>
- [13] *Aereco – ventilation solutions* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.aereco.com/product.php?product=ac>>



- [14] *Fan Affinity Laws* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: [http://www.engineeringtoolbox.com/fan-affinity-laws-d\\_196.html](http://www.engineeringtoolbox.com/fan-affinity-laws-d_196.html)>
- [15] *Axiální ventilátor AVET 350/340E* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: [http://www.ventilatory-kadlec.cz/2004/axv\\_avet-350-340e.php](http://www.ventilatory-kadlec.cz/2004/axv_avet-350-340e.php)>
- [16] *PHL Rigid Pocket Filter* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: [http://www.filtrationgroup.com/index.php/main.page/PHL\\_Rigid\\_Pocket\\_Filter](http://www.filtrationgroup.com/index.php/main.page/PHL_Rigid_Pocket_Filter)>
- [17] *Photoionization detector (PID) HNU* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <http://www.dem.ri.gov/pubs/sops/wmsr2114.pdf>>
- [18] *Snímače koncentrace oxidu uhličitého pro průmysl a vzduchotechniku* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38111.pdf>>
- [19] *Flame Ionization Detector* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: [http://www.shsu.edu/~chm\\_tgc/primers/FID.html](http://www.shsu.edu/~chm_tgc/primers/FID.html)>
- [20] *Landfill Methane Gas* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <http://www.methanegasdetectors.com/info/category/landfill/>>
- [21] *ASEKO - Detektory plynů, snímače plynů, detekce plynů* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <http://www.aseko.cz/pages/detektory-plynu.php>>
- [22] *Thermal Conductivity Sensors* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: [http://www.hitech-inst.co.uk/thermal\\_conductivity\\_sensors.php](http://www.hitech-inst.co.uk/thermal_conductivity_sensors.php)>
- [23] *Less than 24 hours after losing FHA approval, Lend America closes shop* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <http://nationalmortgageprofessional.com/news14933/less-24-hours-after-losing-fha-approval-lend-america-closes-shop>>
- [24] *Sestavné jednotky AeroMaster XP* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <http://www.remak.eu/cz/vyrobky/klimatizacni-jednotky/aeromaster-xp/>>
- [25] Česká republika. Nařízení vlády, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci. 361/2007 Sb.
- [26] Vyhláška Ministerstva zdravotnictví o hygienických požadavcích na stravovací služby. 107/2001 Sb.
- [27] *CONTAM Description* [online]. [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/CONTAM/index.htm>>

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$c_p$	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita vzduchu
$k_i$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	koncentrace škodliviny ve vnitřním prostředí
$k_o$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	koncentrace škodliviny ve vnějším prostředí
$\dot{Q}$	[W]	tepelná zátěž citelným teplem
$\dot{S}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	množství vznikající škodliviny
$t_o$	[°C]	teplota odváděného vzduchu
$t_p$	[°C]	teplota přiváděného vzduchu
$\dot{V}_p$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	objemový tok přiváděného vzduchu
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota přiváděného vzduchu
cca	cirka	
č.	číslo	
FID	flame ionization detector – plameno-ionizační detektor	
MOS	metal oxide semiconductor – kov-oxid-polovodič	
např.	například	
NDIR	nondispersive infrared – nerozptylný infračervený (snímač)	
NIST	National Institute of Standards and Technology	
obr.	obrázek	
PID	photoionization detector – fotoionizační detektor	
PID	proporcionálně-integračně-derivační (regulátor)	
PM10	[°C]	
ppb	parts per billion – objemový podíl v miliardtinách	
ppm	parts per million – objemový podíl v miliontinách	
Sb.	sbírky	
tab.	tabulka	
tj.	to je	
tzv.	takzvané	
UV	ultrafialový	
VOC	volatile organic compounds – těkavé organické sloučeniny	
ZZT	zpětné získávání tepla	