

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Realizace měřicího systému  
pro případovou studii rekuperační jednotky**

**Bc. Vojtěch Šenkýř**

**2019**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch ŠENKÝŘ**

Osobní číslo: **E17N0065P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Technická ekologie**

Název tématu: **Realizace měřicího systému pro případovou studii  
rekuperační jednotky**

Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte typy rekuperačních jednotek a zhodnoťte jejich vhodnost použití.
2. Uveďte požadavky na kvalitu vzduchu v budovách s důrazem na výukové prostory.
3. Podle návrhu proveďte zapojení čidel systému sběru a ověřte správnou funkčnost celého zařízení a systému sběru dat.
4. Proveďte vyhodnocení dat z dlouhodobého měření a ověřte splnění požadavků na kvalitu.
5. Proveďte ekonomickou a energetickou bilanci.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

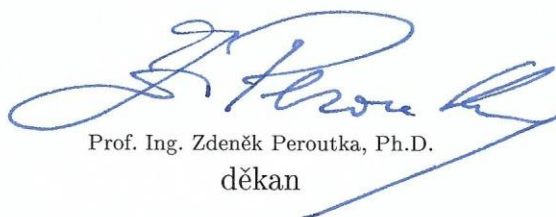
1. MCQUISTON, Faye C., Jerald D. PARKER a Jeffrey D. SPITLER. Heating, ventilating, and air conditioning: analysis and design. 6th ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, c2005. ISBN 978-0471470151
2. BAŠTA, Jiří. Regulace v technice prostředí staveb. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05455-0

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Rot, Ph.D.


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019

  
Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Cílem této diplomové práce je zhodnocení provozu rekuperační jednotky WHISPER AIR umístěné v místnosti EK-319 na Katedře elektroenergetiky a ekologie. Práce hodnotí jak vliv na kvalitu mikroklimatu v místnosti tak hospodárnost jednotky. Úvod práce je věnován přehledu možných způsobů větrání a typů rekuperačních jednotek, a dále hygienickým požadavkům na kvalitu prostředí uvnitř místnosti spolu s limity danými českou legislativou. Následuje popis rekuperační jednotky jako takové, a vyhodnocení jejího vlivu na kvalitu prostředí a na spotřebu elektrické energie. Závěr práce je věnován doporučení jak jednotku řídit v různých obdobích roku tak, aby byla zachována dobrá kvalita vzduchu spolu s co nejnižší spotřebou.

## **Klíčová slova**

ventilace, zpětné získávání tepla, tepelná pohoda, mikroklima, oxid uhličitý, DCV, CAV

**Abstract**

The aim of this thesis is to evaluate the operation of the heat recovery unit WHISPER AIR, located in the room EK-319 at the Department of Electrical Power Engineering and Environmental Engineering. Thesis is focused on both quality of indoor environment and consumption of electrical energy. In the introduction there is a list of ventilation concepts and heat recovery units together with hygiene requirements for indoor environment. The Czech legal requirements are mentioned in the part as well. Another part of the thesis contains the description of the heat recovery unit itself and its effect on indoor environment quality and consumption of electrical energy. In conclusion there is suggestion how to control heat recovery unit in the different conditions during a year to ensure good indoor environment with a low impact on energy consumption.

**Key words**

ventilation, heat recovery, thermal comfort, microclimate, carbon dioxide, DCV, CAV

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

.....

podpis

V Plzni dne 29.5.2019

Bc. Vojtěch Šenkýř

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Davidu Rotovi, Ph.D. a Ing. Jakubu Jiřincovi za ochotné rady a milý přístup při konzultacích. Také bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Sýkorovi, Ph.D. za rady ohledně měření hluku. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, protože především bez její podpory by tato práce nikdy nevznikla.

## Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>12</b>
<b>1 ZPŮSOBY VÝMĚNY VZDUCHU V BUDOVÁCH.....</b>	<b>14</b>
1.1 PŘIROZENÉ VĚTRÁNÍ .....	14
1.2 CENTRALIZOVANÁ VENTILACE .....	15
1.3 DECENTRALIZOVANÁ VENTILACE .....	15
1.4 NUCENÉ PODTLAKOVÉ VĚTRÁNÍ .....	16
1.5 NUCENÉ PŘETLAKOVÉ VĚTRÁNÍ.....	16
1.6 NUCENÉ ROVNOTLAKÉ VĚTRÁNÍ.....	17
1.7 REKUPERACE A REGENERACE TEPLA .....	17
1.8 REKUPERAČNÍ VÝMĚNÍKY .....	17
1.8.1 Deskové rekuperační výměníky .....	20
1.8.2 Trubkové rekuperační výměníky.....	21
1.8.3 Výměníky z tepelných trubic.....	22
1.9 REGENERAČNÍ VÝMĚNÍKY .....	23
1.9.1 Rotační regenerační výměníky .....	23
1.9.2 Kapilární ventilátor .....	25
1.9.3 Přepínací regenerační výměníky .....	25
<b>2 HYGIENICKÉ POŽADAVKY NA KVALITU PROSTŘEDÍ V BUDOVÁCH.....</b>	<b>26</b>
2.1 TEPELNÁ ROVNOVÁHA A TEPELNÁ POHODA ČLOVĚKA .....	26
2.1.1 Teplota vzduchu $t_a$ .....	27
2.1.2 Teplota kulového teploměru $t_g$ .....	27
2.1.3 Střední radiační teplota $t_r$ .....	27
2.1.4 Operativní teplota $t_o$ .....	27



2.1.5	<i>Rychlost proudění <math>v_a</math></i> .....	28
2.1.6	<i>Relativní vlhkost RH</i> .....	28
2.1.7	<i>Tělesná aktivita</i> .....	28
2.1.8	<i>Tepelný odpor oděvu</i> .....	29
2.1.9	<i>Ukazatel PMV</i> .....	30
2.1.10	<i>Ukazatel PPD</i> .....	32
2.1.11	<i>Další faktory ovlivňující tepelnou pohodu</i> .....	32
2.2	POŽADAVKY NA TEPLTNĚ-VLHKOSTNÍ MIKROKLIMA .....	33
2.3	POŽADAVKY NA KVALITU VZDUCHU .....	33
2.4	HLUK A VIBRACE .....	35
<b>3</b>	<b>JEDNOTKA WHISPER AIR .....</b>	<b>38</b>
3.1	ZÁKLADNÍ POPIS JEDNOTKY WHISPER AIR.....	38
3.1.2	<i>Výměník</i> .....	39
3.1.3	<i>Pohon ventilátoru</i> .....	39
3.1.4	<i>Elektrický předehřev a dohřev</i> .....	40
<b>4</b>	<b>SBĚR DAT.....</b>	<b>41</b>
4.1	TEPLOTNÍ A VLHKOSTNÍ ČIDLO .....	43
4.2	VNITŘNÍ ČIDLO CO <sub>2</sub> .....	44
<b>5</b>	<b>VYHODNOCENÍ DAT .....</b>	<b>46</b>
5.1	MĚŘENÍ V EK-419.....	46
5.2	SPOTŘEBA ELEKTRICKÉ ENERGIE .....	46
5.2.1	<i>Provoz v zimních měsících, CAV vs. DCV režim</i> .....	48
5.2.2	<i>Provoz v letních měsících</i> .....	52
5.3	KONCENTRACE CO <sub>2</sub> .....	53
5.3.1	<i>Porovnání s EK-419</i> .....	53
5.3.2	<i>Vlastní měření v EK-319</i> .....	54

5.4	RELATIVNÍ VLHKOST.....	58
5.5	REŽIM FREECOOLING - VYUŽITÍ BYPASSU V LÉTĚ .....	59
5.6	PRAŠNOST .....	60
5.7	PROUDĚNÍ VZDUCHU .....	61
5.8	HLUČNOST.....	63
5.9	VÝPADKY MĚŘENÍ.....	65
<b>6</b>	<b>EKONOMICKÁ A ENERGETICKÁ BILANCE.....</b>	<b>66</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>70</b>

## Úvod

Předmětem této práce je činnost rekuperační jednotky WHISPER AIR a její dopad na kvalitu prostředí uvnitř místnosti. Jednotka totiž zajišťuje nucenou ventilaci v místnosti EK-319. To pomáhá udržet nízkou koncentraci CO<sub>2</sub> spolu s nízkou ztrátou tepla v odváděném odpadním vzduchu.

Koncentrace CO<sub>2</sub> a kvalita vnitřního prostředí uvnitř budov obecně je i přes současnou dostupnost technologií stále dost často na nevyhovující úrovni. Dosud neexistuje žádné vládní nařízení ohledně instalace nucené ventilace např. ve školách, přičemž nucená ventilace je jediný způsob jak v době téměř dokonale utěsněných budov udržet zdravé mikroklima.

Pro vytvoření alespoň částečné představy o systémech větrání a rekuperace tepla uvádím v kapitole 1 rozdíly ve způsobech nucené ventilace a také rozdíl oproti přirozenému větrání obecně. Dále se v této kapitole zabývám způsoby zpětného získávání tepla včetně stanovení účinnosti u jednotlivých výměníků.

Dále jsem v 2. kapitole uvedl obecné hygienické požadavky na kvalitu vnitřního prostředí budov. To jsou zejména parametry ovlivňující tepelnou pohodu člověka ale i pohodu ovlivňovanou hlučností. Uvedl jsem zde limity stanovené českou legislativou a účinky na člověka při překročení těchto limitů.

Následuje kapitola 3 a 4. V kapitole tři, se věnuji popisu jednotlivých částí jednotky jako je výměník, motory a zařízení pro ohřev vzduchu. Také jsou zde stručně uvedeny režimy, ve kterých jednotka může fungovat. Čtvrtá kapitola obsahuje popis měřicího systému použitého pro měření parametrů jednotky a kvality vzduchu v místnosti. Podrobněji jsou zde rozepsány parametry čidel a princip jejich činnosti.

V kapitole 5 se nachází samotné vyhodnocení naměřených dat. Byly vybrány klíčové parametry ovlivňující kvalitu prostředí, zejména koncentrace CO<sub>2</sub>, teplota a relativní vlhkost. Byl zhodnocen vliv jednotky na tyto parametry a také vliv zvoleného režimu větrání na spotřebu elektrické energie.

Poslední kapitola je věnována ekonomické a energetické bilanci jednotky za dobu měření. Je zde také uveden hrubý odhad spotřeby a ceny za spotřebovanou energii v případě, že by jednotka běžela na vhodně zvolený režim pro dané období.

## Seznam symbolů a zkratk

Značka	Název	Rozměr
AC	alternating current / střídavý proud	-
AQS	air quality sensor / čidlo kvality vzduchu	-
CAV	constant air volume flow / konstantní průtok vzduchu	-
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý	-
DC	direct current / stejnosměrný proud	-
DCV	demand controlled ventilation / ventilace na základě kvality vzduchu	-
DPH	daň z přidané hodnoty	-
DR	stupeň obtěžování průvanem	-
e <sub>1</sub> ; e' <sub>1</sub>	stav venkovního vzduchu před výměníkem v létě / v zimě	-
e <sub>2</sub> ; e' <sub>2</sub>	stav venkovního vzduchu za výměníkem v létě / v zimě	-
EC	electronically comutated / elektronicky komutovaný stejnosměrný motor	-
f <sub>CL</sub>	povrchový faktor oděvu	-
i <sub>1</sub> ; i' <sub>1</sub>	stav odpadního vzduchu před výměníkem v létě / v zimě	-
i <sub>2</sub> ; i' <sub>2</sub>	stav odpadního vzduchu za výměníkem v létě / v zimě	-
IPxx	ingress protection marking / stupeň krytí	-
IR	infrared radiation / infračervené spektrum elektromagnetického záření	-
PMW	predicted mean vote / střední tepelný pocit člověka	-
ppm	parts per milion / částic na milion	-
TTHD	transmitter temperature humidity duct / potrubní čidlo teploty a vlhkosti	-
TTHI	transmitter temperature humidity indoor / vnitřní čidlo teploty a vlhkosti	-
TTHO	transmitter temperature humidity outdoor / venkovní čidlo teploty a vlh.	-
ZZCT	zpětné získávání citelného tepla	-
ZZT	zpětné získávání tepla	-
ZZVT	zpětné získávání vázaného tepla	-
FS	full scale / chyba z plného rozsahu	%
PPD	predicted percentage dissatisfied / procentuální počet nespokojených	%
RH	relative humidity / relativní vlhkost	%
THD	total harmonic distortion / zkreslení sinusového signálu	%
η <sub>T</sub>	termická účinnost zpětného získávání tepla	%
η <sub>ZZCT</sub>	účinnost zpětného získávání citelného tepla	%
η <sub>ZZT</sub>	celková účinnost zpětného získávání tepla	%
η <sub>ZZVT</sub>	účinnost zpětného získávání vázaného tepla	%
Φ <sub>e</sub>	teplotní faktor přívodní strany výměníku	%
Φ <sub>i</sub>	teplotní faktor odvodní strany výměníku	%
Ψ <sub>e</sub>	vlhkostní faktor přívodního vzduchu	%
T, t	teplota	°C
t <sub>a</sub>	teplota vzduchu	°C
t <sub>cl</sub>	teplota povrchu oděvu	°C
t <sub>e1</sub>	teplota přiváděného vzduchu před výměníkem	°C
t <sub>e2</sub>	teplota přiváděného vzduchu za výměníkem	°C

$t_g$	výsledná teplota kulového teploměru	$^{\circ}\text{C}$
$t_{i1}$	teplota odváděného vzduchu před výměníkem	$^{\circ}\text{C}$
$t_{i2}$	teplota odváděného vzduchu za výměníkem	$^{\circ}\text{C}$
$t_o$	operativní teplota	$^{\circ}\text{C}$
$t_r$	střední radiační teplota	$^{\circ}\text{C}$
$Q$	elektrický náboj	C
$L_{Aeq, T}$	základní ekvivalentní hladina akustického tlaku	dB
$\varepsilon$	permitivita dielektrika	F/m
$Q$	teplo	J
$\Delta t$	střední teplotní spád	K
$M$	hmotnostní tok	kg/s
$\dot{m}_e; \dot{m}_i$	hmotnostní tok suchého venkovního a odpadního vzduchu	kg/s
$c_{pP}$	měrná tepelná kapacita vodní páry	kJ/kg
$c_{pV}$	měrná tepelná kapacita vzduchu	kJ/kg
$h$	entalpie vlhkého vzduchu	kJ/kg
$h_{e1}; h_{i1}$	entalpie venkovního a odpadního vzduchu před výměníkem	kJ/kg
$h_{e2}; h_{i2}$	entalpie venkovního a odpadního vzduchu za výměníkem	kJ/kg
$h_p$	entalpie vodní páry	kJ/kg
$h_v$	entalpie suchého vzduchu	kJ/kg
$I_0$	výparné teplo vody	kJ/kg
$c$	měrná tepelná kapacita	kJ/kgK
$U$	součinitel přestupu tepla	$\text{kW/m}^2$ K
$d$	vzdálenost mezi elektrodami	m
$v_a$	rychlost proudění vzduchu	m/s
$S$	plocha elektrod	$\text{m}^2$
$I_{CL}$	tepelný odpor oděvu	$\text{m}^2\text{K/W}$
$p_a$	parciální tlak vodní páry	Pa
$U$	elektrické napětí	V
$M$	metabolizmus	$\text{W/m}^2$
$W$	užitečný mechanický výkon	$\text{W/m}^2$
$h_c$	součinitel přestupu tepla konvekcí	$\text{W/m}^2\text{K}$

# 1 Způsoby výměny vzduchu v budovách

Trend snižování spotřeby energií společně s téměř dokonalou vzduchotěsností budov jde proti požadavkům na kvalitu prostředí v budovách. Přirozená ventilace objektů dříve zajištěná netěsnostmi v oknech znamenající trvalý přísun čerstvého vzduchu spolu se snížením vlhkosti, je v současné době výrazně omezena. To nejen snižuje kvalitu vzduchu samotného, ale i zhoršuje mikrobiální mikroklima v budovách. Rozvoj bakterií a plísní má pak negativní vliv na zdraví člověka. Pro udržení kvality prostředí je tedy nutné použít větrání nucené. [1]

Odrazem kvality vzduchu v prostředí je komfort obyvatel místnosti. I přesto, že vnímání komfortu je do jisté míry subjektivní, lze na základě sledování několika parametrů zaručit pohodu většiny lidí. „Nejsnáze“ sledovanými parametry ovlivňujícími komfort uvnitř místnosti jsou teplota, vlhkost, rychlost proudění a koncentrace CO<sub>2</sub>. Požadavkům na kvalitu vzduchu se věnuji v kapitole 2.

Systémy nuceného větrání lze rozdělit podle dvou základních kritérií. Podle umístění zařízení resp. způsobu rozvodu vzduchu na systémy centralizované (centrální) a decentralizované (lokální). A podle způsobu výměny vzduchu na podtlakové, přetlakové a rovnotlaké.

V budoucnosti se očekává nárůst hybridního větrání, což je inteligentní systém kombinující přirozené a nucené větrání k dosažení ještě nižší spotřeby při zachování kvalitního mikroklimatu v budovách. [1]

## 1.1 Přirozené větrání

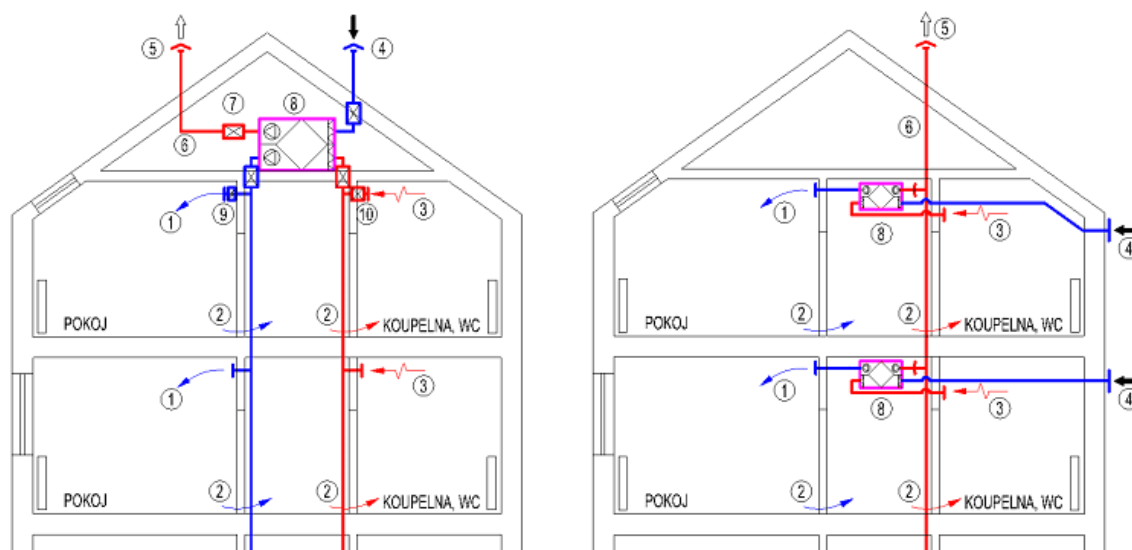
Míra přirozeného větrání je dána tlakovým rozdílem mezi návětrnou a závětrnou stranou budovy a také na rozdílu teplot vně a uvnitř místnosti. Je téměř nemožné určit množství vyměňovaného vzduchu a např. při nulovém rozdílu venkovní teploty a teploty uvnitř místnosti nedochází při bezvětří k větrání vůbec. To může vést k vysokým koncentracím CO<sub>2</sub> v místnosti, nezřídka přesahujících 3000 ppm. Další nevýhodou přirozeného větrání je nežádoucí odvod tepla a ztráta tepelného komfortu uvnitř místnosti a jakákoliv nemožnost jeho rekuperace. [2] [3]

## 1.2 Centralizovaná ventilace

Volba centralizovaného (centrálního) nebo decentralizovaného (lokálního) nuceného větrání závisí hlavně na uvažované aplikaci. Centrální ventilaci je vhodné použít tam, kde je třeba zajistit přísun čerstvého vzduchu do více místností, příp. do místností, jejichž stěny nejsou obvodovými zdmi objektu. Takovým objektem mohou být kancelářské budovy, školy, knihovny apod. Systém využívá jedné výkonnější jednotky umístěné mimo povědomí obyvatel budovy, a soustavy potrubí zajišťujících přívod a odtah vzduchu do jednotlivých místností. Výhodou je zejména fakt, že výkonnější ventilátor dokáže pracovat s vyšší účinností v porovnání s menším zařízením. Použití centrálních rozvodů vzduchu s sebou nese vyšší nároky na prostor, a z toho důvodu je obtížné takový systém instalovat při rekonstrukci stávajících budov. Je také nutné zaručit, aby se hluk vznikající provozem jednotky nešířil dále potrubím a současně, aby se hluk nešířil mezi místnostmi navzájem. I šíření pachů, např. ze skladu do kanceláří, je nežádoucí a je nutné tomuto zabránit. [1] [4]

## 1.3 Decentralizovaná ventilace

Decentralizovaný systém větrání se uplatní zejména v bytových jednotkách nebo pro rekonstrukce stávajících prostor. Ventilační zařízení je umístěno přímo ve větrané místnosti což i přes kultivovanost současných technologií vnáší do prostoru při provozu zařízení hluk. Nesmíme opomenout také estetickou stránku věci, kdy např. sezení pod jednotkou může v lidech vzbuzovat obavy. Výhodou je možnost zajištění různého mikroklimatu pro každou místnost, a lepší přístup k jednotce např. při údržbě. [1] [4]



Obr. 1: Znárodnění nucené ventilace centrální (vlevo) a lokální (vpravo) [1]

#### 1.4 Nucené podtlakové větrání

Nucené podtlakové větrání je zajišťováno ventilátorem odsávajícím vzduch z objektu. Přísun čerstvého venkovního vzduchu byl v minulosti zajištěn samovolným přísáváním skrze přirozené netěsnosti zejména okolo oken. V dnešní době, kdy jsou okna i dveře daleko lépe utěsněna, je nutné dostatečný přísun vzduchu zajistit větracím otvorem. Větrací otvor může být osazen filtrem, tlumičem hluku a případně termostatem, kterým lze regulovat průtok na základě teploty venkovního vzduchu. [1] [5]

Pokud by dostatečný přísun venkovního vzduchu nebyl zajištěn, může docházet k přísávání vzduchu z okolních chodeb nebo bytů, který nelze považovat za čerstvý. V krajních případech, při použití plynových spotřebičů, může jít při nedostatečném odvětrání produktů spalování i o život. [5]

#### 1.5 Nucené přetlakové větrání

Nucené přetlakové větrání je do jisté míry opakem podtlakového větrání. Realizováno je pomocí ventilátoru vhánějícího vzduch do objektu, proudění směrem ven zajišťují netěsnosti. Přívod vzduchu je možné opatřit filtrem i ohřevem vzduchu, tak aby nebyl narušen komfort v místnosti. Vzduch je obvykle dopravován do středu objektu, aby se zajistilo jeho co nejlepší rozložení. Kuchyně, koupelny nebo WC se ale stále osazují odťahovým ventilátorem, který zajistí nárazové vyvětrání těchto prostor. [6]

Podtlakové i přetlakové větrání je poměrně jednoduché a levné na pořízení, nicméně náklady je nutné vynaložit na ohřev vzduchu otopnou soustavou, protože spolu



s odváděným vzduchem uniká i teplo.

## 1.6 Nucené rovnotlaké větrání

Oproti předchozím typům větrání je u rovnotlaké ventilace současně s ventilátorem čerstvého vzduchu v jednotce instalován i ventilátor na odvod vzduchu z místnosti. tomu je možné předávat teplo odpadního vzduchu tomu čerstvému – tzn. rekuperovat. Způsobům rekuperace se věnuji v kapitole 1.7. Výhodou je také kvalitnější čištění čerstvého vzduchu a lepší odhlučnění místnosti od venkovního prostředí. Kvalitativně lze tedy rovnotlaké větrání řadit nad větrání podtlakové a přetlakové. Daní za lepší funkci jsou vyšší náklady na pořízení i provoz (je nutné hradit tlakovou ztrátu vzduchovodu) a vyšší nároky na prostor. [1] [7]

## 1.7 Rekuperace a regenerace tepla

Rekuperace resp. regenerace, někdy označovaná jako zpětné získávání tepla (ZZT) je způsob předávání tepla odpadního vzduchu venkovnímu vzduchu vstupujícímu do objektu. K přestupu dochází ve výměníku. Tímto lze vstupní vzduch ohřát na teplotu blízkou odpadnímu vzduchu i bez použití dohřevu.

Rekuperací se rozumí přenos tepla z jedné látky do druhé buď přímo přes stěnu nebo nepřímo jiným nositelem tepla.

Regenerací se rozumí přenos tepla skrze akumulární hmotu. Výhodou regenerace vzduchu je možnost přenášet spolu s teplem i vlhkost.

Z tohoto hlediska výměníky rozlišujeme na rekuperační (rekuperátory) a regenerační (regenerátory), viz další kapitoly.

## 1.8 Rekuperační výměníky

Rekuperační výměníky jsou takové, ve kterých nedochází ke kontaktu vyměňovaného vzduchu s čerstvým – oba toky jsou odděleny pevnou přepážkou.

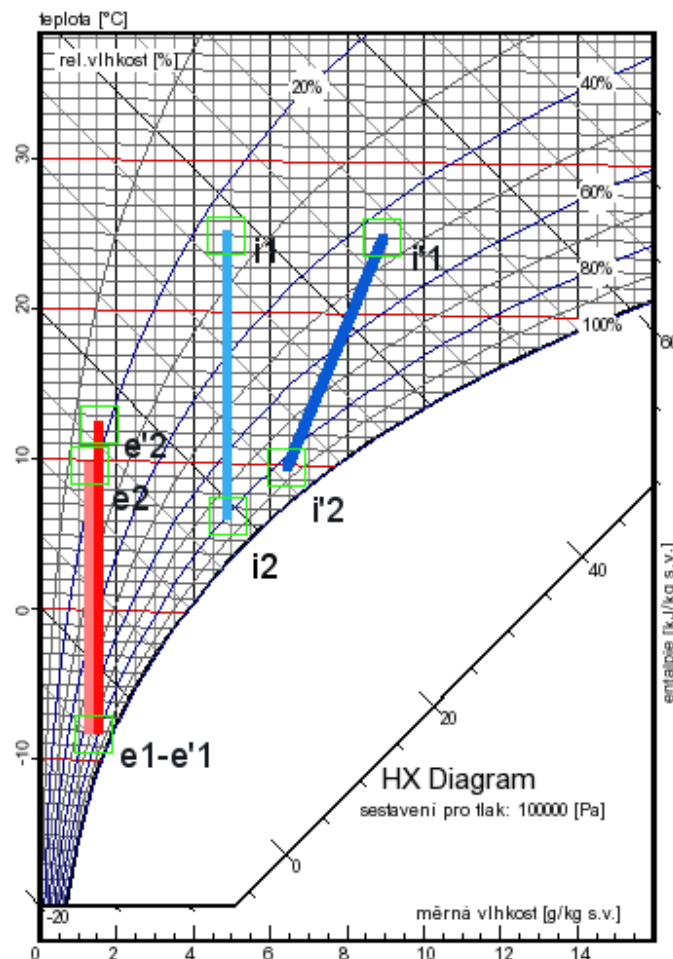
Lze je dělit na výměníky s přímou výměnou a s výměnou přes tekutinu. Mezi výměníky s přímou výměnou patří výměníky deskové a trubkové. Hovoříme-li o výměně přes tekutinu, máme na mysli výměníky z tepelných trubic. [3] [1]

Rekuperátory dokáží přenášet teplo citelné, za specifických podmínek i latentní. Nedokáží však přenášet vlhkost.

V období léta, kdy se venkovní vzduch prochází vzduchem odpadním a teplota přenosové plochy výměníku je vyšší než teplota rosného bodu venkovního vzduchu, se předává pouze teplo citelné. Tomu odpovídají stavy  $e_1$ - $e_2$  a  $i_1$ - $i_2$  na Obr. 2. [8]

V zimním období, pokud je odpadní vzduch dostatečně vlhký, může nastat situace, kdy teplota výměníku na straně odpadního vzduchu je nižší než teplota rosného bodu. Tím dojde ke kondenzaci vlhkosti z odpadního vzduchu, který se nejen ochlazuje ale i odvlhčuje. Nyní se spolu s teplem citelným uvolňuje i teplo latentní, vázané ve vlhkosti. Venkovnímu vzduchu se tedy předá více tepla, než by se předalo v případě, že odpadní vzduch bude suchý. [8]

Na Obr. 2 je tento stav vyobrazen hodnotami  $e'_1$ - $e'_2$  a  $i'_1$ - $i'_2$ . Zvýšení účinnosti je v řádu jednotek procent. [8]



Obr. 2: hx diagram změny stavu vzduchu v rekuperátoru [8]

Účinnost rekuperátorů se stanovuje na základě poměrů tepelného toku přenášeného mezi venkovním a odpadním vzduchem. [3]

$$\eta_{ZZT} = \frac{\dot{m}_e(h_{e2} - h_{e1})}{\dot{m}_i h_{i1} - \dot{m}_e h_{e1}} (\%) \quad (1.1)$$

kde:

$h_{i1}$ ,  $h_{e1}$  je entalpie odpadního a venkovního vzduchu na vstupu do rekuperátoru (kJ/kg)

$h_{i2}$ ,  $h_{e2}$  je entalpie odpadního a venkovního vzduchu na výstupu z rekuperátoru (kJ/kg)

$\dot{m}_i$ ,  $\dot{m}_e$  je hmotnostní tok suchého odpadního vzduchu a venkovního vzduchu (kg/s)

Uvažujeme-li rovnotlaké větrání, tedy stejný průtok na obou stranách výměníku, zjednoduší se vztah pouze na poměr rozdílů entalpií.

$$\eta_{ZZT} = \frac{h_{e2} - h_{e1}}{h_{i1} - h_{e1}} = \frac{\Delta h_{přenesená}}{\Delta h_{maximální}} (\%) \quad (1.2)$$

Entalpie nenasyčeného a nasyceného vlhkého vzduchu  $h$ , je dána součtem entalpie vzduchu suchého  $h_v$  a entalpie vodní páry  $h_p$  vztahující se na 1 kg suchého vzduchu.

Pro 1 kg suchého vzduchu a  $x$  kg vodní páry platí vztah:

$$h = h_v + x h_p \left( \frac{J}{kg} \right) \quad (1.3)$$

Entalpie suchého vzduchu v rozsahu teplot -30 až 100 °C, kdy lze uvažovat měrnou tepelnou kapacitu vzduchu  $c_{pV} = 1,01 \frac{kJ}{kg}$ , se určí ze vztahu:

$$h_v = c_{pV} t = 1,01 t \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (1.4)$$

Entalpii vodní páry v oblasti do 90 °C a 10 kPa lze vyjádřit lineární závislostí na teplotě vztahem:

$$h_p = I_0 + c_{pP} t = 2500 + 1872 t \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (1.5)$$

Dosazení do první rovnice dostáváme vztah pro celkovou entalpii:

$$h = 1,01t + (2500 + 1,872t)x \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (1.6)$$

Lze určit také tzv. termickou účinnost ohřevu (v zimě) vztaženou k přiváděnému vzduchu, jako poměr rozdílů teplot přiváděného vzduchu a rozdílů přiváděného a odváděného vzduchu před výměníkem:

$$\eta_T = \frac{t_{e2} - t_{e1}}{t_{i1} - t_{e1}} (\%) \quad (1.7)$$

kde:

$t_{e1}$  je teplota venkovního vzduchu před rekuperátorem ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_{e2}$  je teplota venkovního vzduchu za rekuperátorem ( $^{\circ}\text{C}$ )

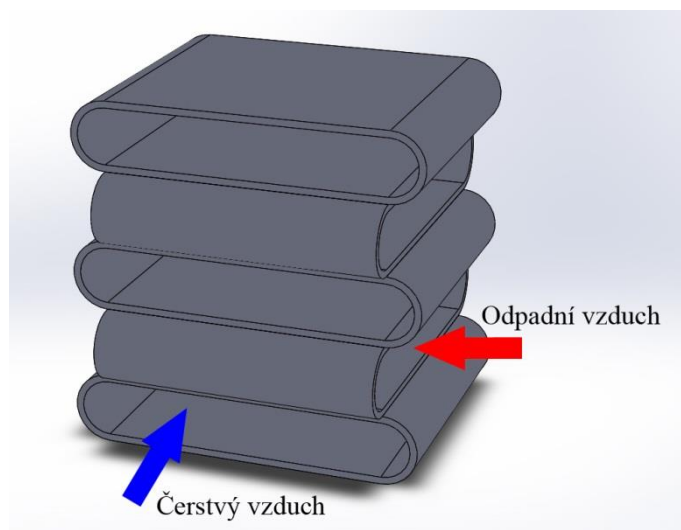
$t_{i1}$  je teplota odpadního vzduchu před rekuperátorem ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_{i2}$  je teplota odpadního vzduchu za rekuperátorem ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 1.8.1 Deskové rekuperační výměníky

Deskové výměníky jsou velmi rozšířené v aplikacích s menším průtokem vzduchu. Vzdušné proudy odváděného a přiváděného vzduchu jsou od sebe odděleny teplosměnnou přepážkou, což je obvykle tenká stěna z hliníku, oceli příp. plastu. Přepážka je tvořena deskami kvadratického tvaru. Takových přepážek je nad sebou několik a jsou vůči sobě přeloženy o  $90^{\circ}$ , vzdušné proudy na sebe tedy proudí příčně. Z tohoto důvodu, že jsou kanálky nízké řádově několik milimetrů, může v chladnějších obdobích docházet k zamrznutí z kondenzované vlhkosti na odvodní straně výměníku. Namrznutí nejenže způsobuje tlakovou ztrátu a snižuje účinnost přestupu tepla, ale v krajních případech může dojít k poškození výměníku. Proto se výměník umísťuje s určitým sklonem, aby byl zajištěn odvod kondenzátu. Výměníky mohou být vybaveny i předeřevem.

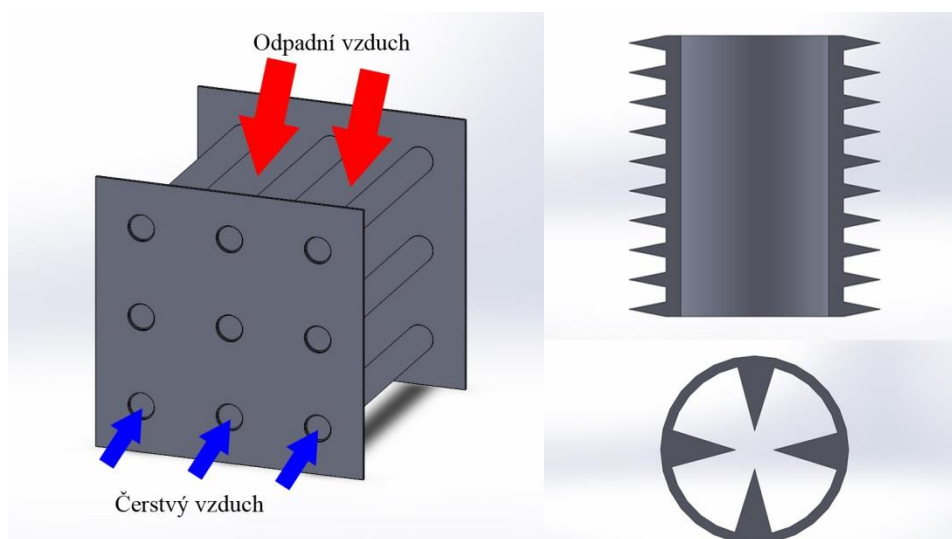
Vyjma křížového uspořádání (Obr. 3) existuje ještě uspořádání protiproudé. Deskové výměníky dosahují až 90% účinnosti, vyšších hodnot obvykle dosahují protiproudé výměníky. [1] [9] [10]



Obr. 3: Znárodnění deskového křížového výměníku [3]

### 1.8.2 Trubkové rekuperační výměníky

Trubkové výměníky jsou obdobou deskových s tím rozdílem, že kanálky, kterými protéká vzduch, jsou tvořeny ze svazků trubek. Trubky mohou být hladké nebo pro zlepšení přenosu tepla žebrované. Venkovní vzduch protéká uvnitř trubek, zatímco z vnější strany je obtékán vzduchem odpadním. Tím se zlepšuje možnost vyčištění prostoru zaneseného nečistotami z odpadního vzduchu. V případě žebrovaných trubek je žebrování také uzpůsobeno snazšímu čištění. Uvnitř jsou žebrované podélně, zatímco na vnější straně je žebrování provedeno příčně na osu trubky. [3] [1]



Obr. 4: Znárodnění trubkového výměníku a trubek s vnějším/vnitřním žebrováním [3]

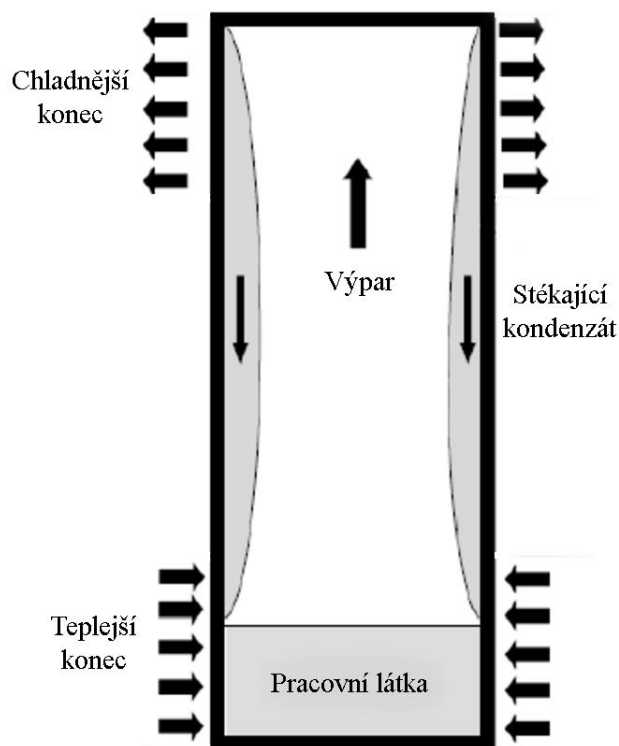
Výhodou oproti deskovým výměníkům je vyšší pevnost trubek, což umožňuje využití např. skla. Vlivem menší teplosměnné plochy dosahují nižších účinností do 50 %. [11]

### 1.8.3 Výměníky z tepelných trubic

Tepelná trubice je uzavřená nádoba z mědi nebo oceli naplněná pracovní látkou. Při rozdílu teplot obou konců trubice dochází na straně teplejšího konce k odpařování pracovní látky. Ta se vlivem nárůstu tlaku přesouvá k chladnějšímu konci, kde kondenzací předává teplo. Rozdíl obou konců může být menší než 1 K. Pracovní látka se volí s ohledem na její výparný tlak tak, aby vypařování nastalo při teplotě ochlazovaného vzduchu. [3]

Konstrukčně existují provedení se svislým umístěním trubice a s kapilárními trubicemi. U svislého provedení je spodní proud ochlazovaný a teplo se předává na horním konci trubice proudu ohřivanému. Délka trubice mohou být řádově i metry. Přenášený tepelný výkon je ovlivněn rychlostí, s jakou se kapalina vrací zpět k výparnému konci. Toto uspořádání má tu nevýhodu, že je nutné zaměřovat proudy venkovního a odpadního vzduchu v závislosti na ročním období. Tedy v zimě je nutné ochlazovat odpadní vzduch, zatímco v létě venkovní. Z toho důvodu se toto uspořádání nehodí pro aplikaci v rekuperačních jednotkách. [3]

Pro použití v menších prostorech, se používají kapilární trubice. Díky kapilárnímu efektu, je možné dostávat medium na druhý konec trubice, dlouhé několik centimetrů, i proti směru působení gravitace. [3]



Obr. 5: Znázornění tepelné trubice [3]

Velká hustota přenášeného tepelného toku zajišťuje, že tyto výměníky dosahují malých rozměrů a hmotností. [3]

## 1.9 Regenerační výměníky

Regenerační výměníky využívají předání tepla z jednoho média do akumulární hmoty a následného předání tepla druhému médiu. Akumulaci lze provádět kontinuálně, nebo nárazově v intervalech. Předností regeneračních výměníků je vysoká účinnost při zachování kompaktních rozměrů, a možnost předávání tepla i vlhkosti. [1]

Účinnost regenerátorů, vztaženou k venkovnímu vzduchu, lze posoudit zvlášť pro zpětné získávání citelného tepla (ZZCT), vázaného tepla (ZZVT) nebo jako celkovou účinnost ZZT, což je součet ZZCT a ZZVT. Viz následující rovnice (opět platí pro zimní období, tzn. ohřev vzduchu, zvlhčení vzduchu a přírůstek entalpie):

$$\eta_{ZZCT} = \frac{t_{e2} - t_{e1}}{t_{i1} - t_{e1}} (\%) \quad (1.8)$$

$$\eta_{ZZVT} = \frac{x_{e2} - x_{e1}}{x_{i1} - x_{e1}} (\%) \quad (1.9)$$

$$\eta_{ZZT} = \frac{h_{e2} - h_{e1}}{h_{i1} - h_{e1}} (\%) \quad (1.10)$$

Použité indexy se shodují s kapitolou 1.8.

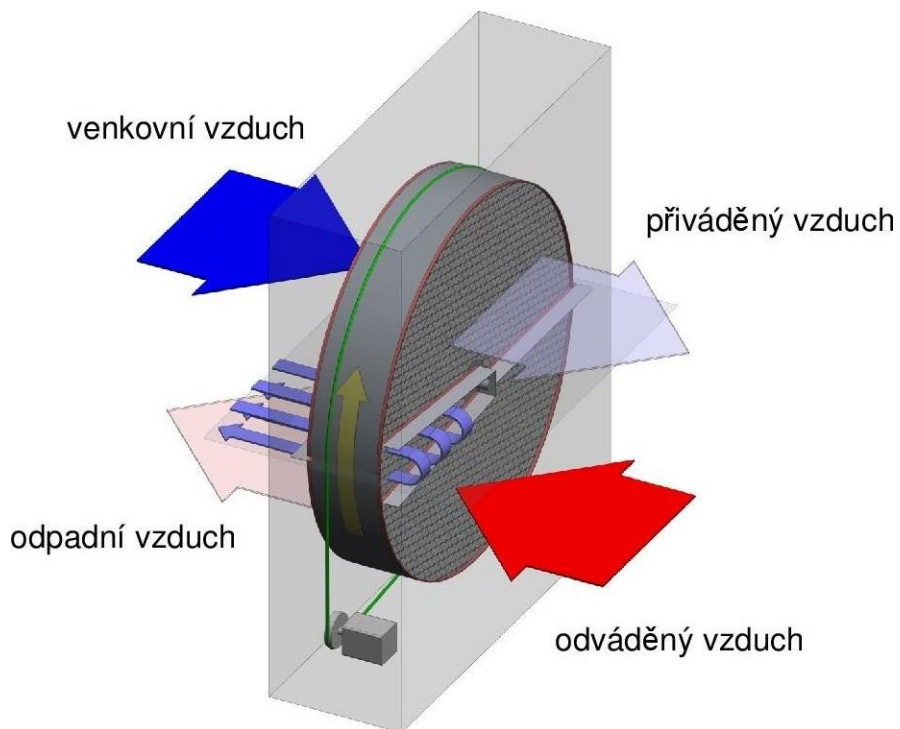
### 1.9.1 Rotační regenerační výměníky

Akumulace je zajišťována válcem, z tenké zvlhčené pásoviny 0,12 až 0,15 mm tlusté. Pokud výměník přenáší i vlhkost, což zajišťuje hygroskopická vrstva na válci, je válec vyroben nejčastěji z papíru napuštěného lithiumchloridem, nebo z plastu s hygroskopickými vlastnostmi. Případně se dá použít i hliníkového válce s nanesenou hygroskopickou vrstvou. U kovových válců se využívá oxidace povrchu válce, což také zlepšuje hygroskopické vlastnosti. [3]

Otáčením válce (typicky 10-30 ot./min) v ocelovém rámu, které zajišťuje el. motor s převodem přes řemen, válec střídavě prochází proudem čerstvého a odpadního vzduchu.

Přívod obou proudů bývá nejčastěji protiproudý. Proudění vzduchu v kanálcích o průřezu přibližně  $2 \text{ mm}^2$  je laminární, což zlepšuje přenos tepla. Uvádí se, že  $1 \text{ m}^3$  objemu válce má až  $3\,000 \text{ m}^2$  přenosové plochy. Průměr válce bývá 0,6 až 5 m. [3]

Pro snížení přenosu nečistot mezi jednotlivými proudy prochází rotující výměník tzv. pročišťovací zónou, kde jsou kanálky profouknuty čistým vzduchem. Z toho plyne nevýhoda rotačních výměníků, a sice přestup nečistot a škodlivin mezi oběma médii. [9] [11]



Obr. 6: Rotační výměník [11]



### 1.9.2 Kapilární ventilátor

Zvláštní kombinací ventilátoru a výměníku, umožňující kontinuální ZZT, je kapilární výměník. Ve spirálovitém statoru s dvojitým počtem nasávacího a výfukového potrubí se otáčí akumulární rotor s pórovitou hmotou (pěnový polyuretan) na povrchu. Rotor tedy zprostředkovává jak nasávání a výfuk vzduchu, tak přenos tepla mezi oběma proudy. [3]

Odpadní i čerstvý vzduch se nasává do středu rotoru, kde je oddělen statickou přepážkou. Vzdušiny poté otáčením rotoru radiálně prostupují skrz akumulární hmotu do prostoru statoru. Teplejší vzduch dodá teplo akumulární látce, která ho pak předá vzduchu chladnějšimu. Tím že se rotor otáčí, nehrozí, že by docházelo k zamrznání kondenzované vlhkosti uvnitř akumulární hmoty. Kapičky vlhkosti jsou odstředivou silou jednoduše vymrštěny ven. [3]

Účinnost ZZT se pohybuje okolo 45 % a používají se pro průtoky do 12 000 m<sup>3</sup>/h. Regulace ZZT u kapilárního ventilátoru je realizována obtokem, kdežto u rotačního výměníku změnou otáček rotoru. [3]

### 1.9.3 Přepínací regenerační výměníky

Na rozdíl od rotačních regeneračních výměníků je akumulární hmota umístěna stále ve stejné poloze a přestup tepla je zajištěn přepínáním proudů vzduchu. Přepínání je realizováno pomocí klapek. Interval přepínání bývá řádově několik desítek vteřin, v závislosti na velikosti akumulární hmoty. Podobně jako u rotačních výměníků zde není možné zamezit přenosu škodlivin mezi jednotlivými proudy. Teplotní účinnost dosahuje až 90 %, vlhkostní účinnost 70 %. [9] [11]

## 2 Hygienické požadavky na kvalitu prostředí v budovách

Nucenou ventilací ovlivňujeme řadu parametrů v místnosti / v budově. Změna těchto parametrů má pochopitelně vliv jak na technická zařízení (zejména relativní vlhkost) tak hlavně na osoby pohybující se v tomto prostředí (teplota, koncentrace CO<sub>2</sub>, rychlost proudění).

Úkolem limitů a doporučení týkajících se mikroklimatu v budovách, je zajistit zdravé pracovní prostředí pro člověka a jeho tepelnou pohodu. Před odkázáním na konkrétní požadavky dané legislativou, příp. normami je nejprve nutné uvést alespoň základní veličiny a pojmy hodnotící mikroklima v obývaných budovách.

### 2.1 Tepelná rovnováha a tepelná pohoda člověka

Kvalita vnitřního prostředí v budovách je dána souhrnem fyzikálních, chemických a biologických ukazatelů. Všechny tyto pochody ovlivňují i tepelnou pohodu člověka. Pocit tepelné pohody nastává při dosažení tepelné rovnováhy, tedy stavu, kdy teplo odebrané okolím je shodné s teplem produkovaným tělem bez výrazného pocení (tzv. suché pocení). Vzhledem k tomu, že vnímání tepelné pohody je značně subjektivní a je ovlivňováno velkým množstvím faktorů, je někdy tepelná pohoda popisována jako stav, ve kterém největší procento osob udává pohodu prostředí. Faktory prostředí ovlivňující tepelnou rovnováhu člověka a tím i jeho pohodu jsou: [3] [12]

- teplota vzduchu  $t_a$
- výsledná teplota kulového teploměru  $t_g$
- střední radiační teplota  $t_r$
- operativní teplota  $t_o$
- rychlost proudění  $v_a$
- relativní vlhkost RH

Tyto faktory lze přímo změřit nebo stanovit výpočtem, tak jak je uvedeno v následujících podkapitolách.

Tepelná pohoda je ale také ovlivňována tělesnou aktivitou jedince, a tepelným odporem jeho oděvu, což jsou tzv. faktory osobní. Teplo generované lidským tělem závisí také na věku, pohlaví a tělesné stavbě jedince. [3]

### 2.1.1 Teplota vzduchu $t_a$

Pro měření teploty vzduchu se používá jakékoli čidlo s přesností alespoň  $\pm 0,5$  °C. Hodnota  $t_a$  je postačující ke zhodnocení vlivu prostředí na člověka pouze v teplotně homogenním prostředí, bez sálavých zdrojů a většího proudění vzduchu. [13]

### 2.1.2 Teplota kulového teploměru $t_g$

Teplota kulového teploměru je základní sledovanou teplotní veličinou. Měří se kulovým teploměrem Vernon nebo Vernon-Jokl. Skládá se z měděné koule s absorbujičím černým povrchem (plech či polyuretan) do které se vkládá libovolný teploměr nebo teplotní čidlo. V tomto sestavení odpovídá teplota naměřená teploměrem společnému působení teploty vzduchu, okolních ploch a rychlosti proudění vzduchu. [13]

### 2.1.3 Střední radiační teplota $t_r$

Střední radiační teplota je průměrná teplota okolních ploch, při které se sáláním předá stejné množství tepla jako ve skutečném prostředí. Obvykle se stanovuje výpočtem z hodnoty kulového teploměru, teploty vzduchu a rychlosti proudění vzduchu viz následující rovnice. Případně ji lze měřit přímo radiometricky. [13]

$$\bar{t}_r = [(t_g + 273)^4 + 2,9 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6} (t_g - t_a)]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (1.11)$$

kde:

$t_g$  je výsledná teplota kulového teploměru  $\varphi$  0,10 m (°C);

$t_a$  je teplota vzduchu (°C);

$v_a$  je rychlost proudění vzduchu (m/s).

### 2.1.4 Operativní teplota $t_o$

Spolu s teplotou kulového teploměru  $t_g$  je operativní teplota  $t_o$  hlavní sledovanou teplotní veličinou. Stanovuje se výpočtem z průměrných hodnot střední radiační teploty, teploty vzduchu a koeficientu A který charakterizuje rychlost proudění vzduchu. Pokud rychlost proudění vzduchu je nižší než 0,2 m/s lze nahradit  $t_o$  přímo hodnotou kulového teploměru  $t_g$ . Při rozdílu  $t_g$  a  $t_a$  menším než 1 °C je možné jako výslednou teplotu použít teplotu  $t_a$ . [13]

$$t_o = \bar{t}_r + A(t_a) \quad (1.12)$$

kde:

$t_a$  je teplota vzduchu (°C);

$t_r$  je střední radiační teplota ve stupních Celsia (°C);

A je koeficient, který je funkcí rychlosti proudění vzduchu

### 2.1.5 Rychlost proudění $v_a$

Člověk v uzavřeném prostoru vnímá vzduch proudící kolem sebe jako průvan. Zvláště citlivý je pak na průvan, jehož teplota je nižší než teplota vzduchu v místnosti. Od teploty proudícího vzduchu se poté odvíjí maximální přípustná rychlost proudění. [13]

### 2.1.6 Relativní vlhkost RH

Pokud je RH v letních měsících menší než 60 %, lze vliv vlhkosti na tepelný stav prostředí zanedbat. Pokud je hodnota vyšší, zhoršuje se, díky vyššímu parciálnímu tlaku vodní páry, schopnost odpařování potu z pokožky a tím je narušená tepelná pohoda. Udává se, že schopnost člověka rozeznat při  $t_o=20$  °C rozdíl mezi 30% RH a 70% RH je téměř nulový. Tyto hodnoty se tedy považují za přípustné. Příliš nízké hodnoty pod 30 % RH způsobují vysoušení sliznic a mohou tak na člověka působit nepříjemně. Tento problém se týká hlavně zimních měsíců, kdy je RH venkovního prostředí obecně nižší než v létě. [13]

### 2.1.7 Tělesná aktivita

Jednotka vyjadřující míru činnosti lidského metabolismu je Met (Metabolism). Met odpovídá tepelné produkci sedícího člověka, která je stanovena na 58,2 W/m<sup>2</sup>. Uvažovaná plocha těla dospělého člověka je 1,82 m<sup>2</sup>. V přepočtu se tedy tepelný výkon generovaný dospělým člověkem při aktivitě 1 Met rovná 106 W. Met je klasifikován pro různé lidské činnosti viz Tabulka 1. [14]

Činnost	Metabolismus	
	(W.m <sup>-2</sup> )	(met)
Bazální metabolismus	45	0,8
Sezení, odpočívání	58	1,0
Stání, odpočívání	65	1,1
Běžná kancelářská práce	75	1,3
Lehká práce na strojích	150	2,6
Těžká manuální práce	250	4,3
Chůze po rovině (4 km.h <sup>-1</sup> )	140	2,4
Chůze po rovině (6 km.h <sup>-1</sup> )	200	3,5
Chůze se stoupáním 5 % (4 km.h <sup>-1</sup> )	200	3,5
Chůze se stoupáním 15 % (4 km.h <sup>-1</sup> )	340	5,7

Tabulka 1: Hodnoty metabolismu pro vybrané činnosti člověka [14]

### 2.1.8 Tepelný odpor oděvu

Další veličinou ovlivňující působení teploty okolí na tepelnou pohodu člověka je Clo (Clothing insulation). Vyjadřuje tepelnou izolaci oděvu, přičemž 1 Clo odpovídá 0,155 m<sup>2</sup>K/W. Tepelné odpory jednotlivých částí oblečení se sčítají. Odpor při přestupu tepla mezi pokožkou a oblečením není zahrnut. Hodnoty Clo typického oblečení jsou uvedeny v Tabulka 2. [15]

Denní běžné oblečení	I <sub>cl</sub>	
	clo	m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup>
Kalhotky, tričko, lehké ponožky, sandály	0,30	0,050
Kalhotky, spodnička, punčochy, lehké šaty s rukávy, sandály	0,45	0,070
Spodky, košile s krátkými rukávy, lehké kalhoty, ponožky, polobotky	0,50	0,080
Kalhotky, punčochy, košile s krátkými rukávy, sukně, sandály	0,55	0,085
Spodky, košile, lehčí kalhoty, boty	0,60	0,095
Spodní prádlo, košile, kalhoty, ponožky, boty	0,70	0,110
Kalhotky, spodnička, košile, sukně, silné podkolenky, boty	0,90	0,140
Spodky, nátělník, košile, kalhoty, svetr s věčkem, ponožky, boty	0,95	0,145
Kalhotky, košile, kalhoty, sako, ponožky, boty	1,00	0,155
Kalhotky, punčochy, blůzka, dlouhá sukně, sako, boty	1,10	0,170

Tabulka 2: Odpor běžného denního oblečení [15]

### 2.1.9 Ukazatel PMV

Jak již bylo zmíněno v prvním odstavci kapitoly 2.1, pocit tepelné pohody je do jisté míry subjektivní a je zde tedy snaha toto objektivizovat. K tomu slouží ukazatelé PMV a PPD. Definicí a použitím těchto ukazatelů se věnuje norma ČSN ISO 7730.

PMV (Predicted mean vote) popisuje střední tepelný pocit člověka v závislosti na jeho činnosti, oděvu a faktorech prostředí pomocí sedmistupňové škály (viz Tabulka 3). Dává tedy do souvislosti vliv faktorů osobních a faktorů prostředí. Díky němu lze ověřit, zda prostředí odpovídá kritériím na tepelnou pohodu. [16]

Horko	3
Teplo	2
Mírné teplo	1
Neutrální	0
Mírné chladno	-1
Chladno	-2
Zima	-3

Tabulka 3: Sedmistupňová stupnice tepelných pocitů [16]

PMV se stanovuje výpočtem a to z následujících rovnic: [16]

*PMV*

$$\begin{aligned}
 &= [0,303 \times \exp(-0,036 \times M) + 0,028] \\
 &\times \left\{ \begin{aligned}
 &((M - W) - 3,05 \times 10^{-3}[5733 - 6,99(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15]) \\
 &-1,7 \times 10^{-5}M(5867 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) \\
 &-3,96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)
 \end{aligned} \right\} \quad (1.13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_{cl} &= 35,7 - 0,028(M - W) \\
 &- I_{cl}\{3,96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_{cl}(t_{cl} - t_a)\} \quad (1.14)
 \end{aligned}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{pro } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{pro } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (1.15)$$

$$f_{cl} = f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{pro } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{pro } I_{cl} \geq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases} \quad (1.16)$$

kde:

- M je metabolismus ve watech na metr čtvereční ( $\text{W}/\text{m}^2$ );
- W je užitečný mechanický výkon ve watech na metr čtvereční ( $\text{W}/\text{m}^2$ );
- $I_{cl}$  je tepelný odpor oděvu v metrech čtverečních a kelvinech na watt ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );
- $f_{cl}$  je povrchový faktor oděvu;
- $t_a$  teplota vzduchu ve stupních Celsia ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $t_r$  střední radiační teplota ve stupních Celsia ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $v_{ar}$  relativní rychlost proudění vzduchu v metrech za sekundu (m/s);
- $p_a$  parciální tlak vodní páry v paskalech (Pa);
- $h_c$  součinitel přestupu tepla konvekcí ve watech na metr čtvereční a kelvin ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ );
- $t_{cl}$  teplota povrchu oděvu ve stupních Celsia ( $^{\circ}\text{C}$ ).

V normě se uvádí, že ukazatel se má používat pouze v rozmezí -2 až +2. To odpovídá následujícímu rozmezí šesti hlavních parametrů:

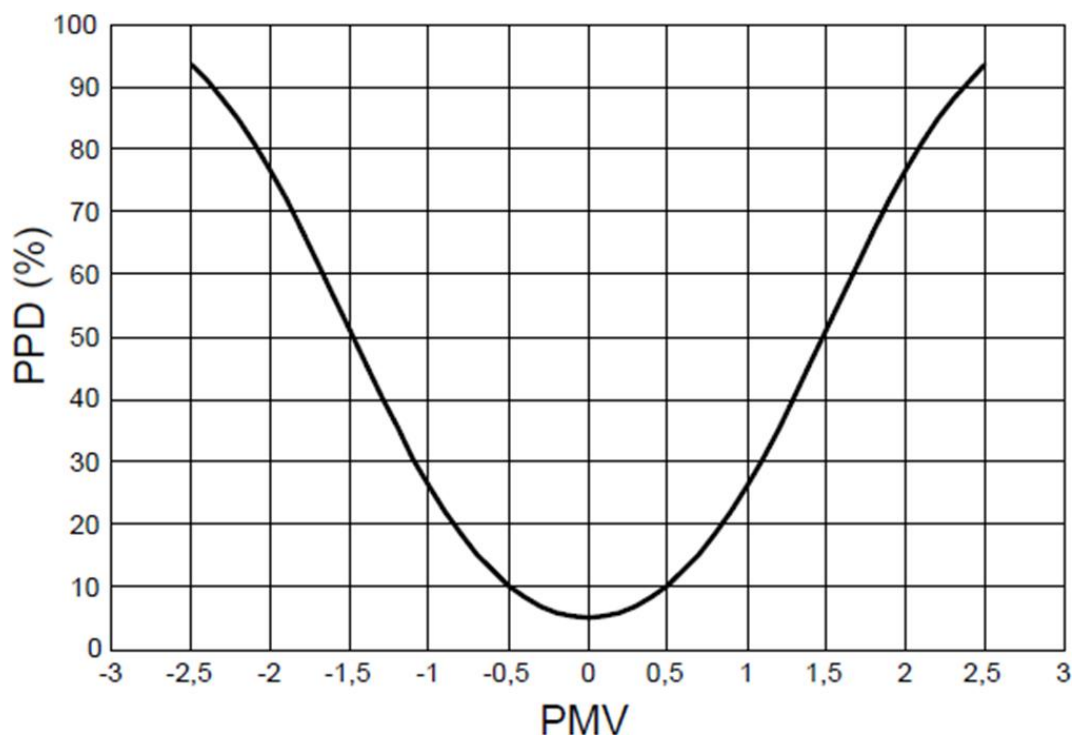
- M 46  $\text{W}/\text{m}^2$  až 232  $\text{W}/\text{m}^2$  (0,8 met až 4 met);
- $I_{cl}$  0  $\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$  až 0,310  $\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$  (0 clo až 2 clo);
- $t_a$  10  $^{\circ}\text{C}$  až 30  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $t_r$  10  $^{\circ}\text{C}$  až 40  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $v_{ar}$  0 m/s až 1 m/s;
- $p_a$  0 Pa až 2 700 Pa.

PMV lze také stanovit z tabulky hodnot PMV pro různé kombinace lidské činnosti, oděvu a teploty. Tabulka je součástí příloh normy. Posledním způsobem je PMV přímo změřit a to za použití k tomu určené sondy. [16]

### 2.1.10 Ukazatel PPD

PPD (Predicted percentage dissatisfied) předpovídá počet osob, které se budou pravděpodobně v daném prostředí cítit nepohodlně, ať už z důvodu tepla nebo chladu. PPD je tedy doplňující ukazatel k PMV, ze kterého se také počítá, viz následující rovnice:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (1.17)$$



Obr. 7: PPD jako funkce PMV [16]

### 2.1.11 Další faktory ovlivňující tepelnou pohodu

PMV a PPD hodnotí lidské tělo jako celek. Tepelná pohoda je však ovlivněna i v případě vystavení pouze části těla teplotním změnám (tzv. místní diskomfort). Takové narušení bývá velmi často způsobeno průvanem. Norma uvádí i výpočet stupně obtěžování průvanem značený jako DR. Legislativou je pak stanovena maximální přípustná míra rychlosti proudění viz Tabulka 4. [16]

Vliv na pohodu má i vertikální rozložení teploty v místnosti, kde se měří rozdíl teplot vzduchu mezi hlavou a kotníky. V oblasti nohou hraje významnou roli i teplota podlah, zejména pokud je chladno na nohy. V případě místnosti s okny nebo místnosti vytápěné sálavými panely je také nutné brát ohled na tzv. teplotní asymetrii. Teplotní asymetrie vzniká při rozdílu radiační teploty dvou stěn. Např. v zimním období chlad od okna



v kontrastu s teplotou protilehlé stěny. Požadavky na tepelný komfort mohou být ovlivněny také místními podmínkami podnebí. [16]

## 2.2 Požadavky na teplotně-vlhkostní mikroklima

V rámci této práce zmíním převážně požadavky týkající se výukových prostor. Část požadavků na mikroklima stanovuje vyhláška č. 410/2005 Sb. „O hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých.“

Ta stanovuje minimální přípustnou teplotu v učebnách v jednom dni na 16 °C, a ve třech po sobě následujících dnech na 18 °C. Provoz výukové činnosti pod touto teplotou není povolen. Vyhláška také stanovuje množství přiváděného čerstvého vzduchu na osobu/žáka v rozmezí 20-30 m<sup>3</sup>/hod přičemž nesmí být překročena rychlost proudění vzduchu 0,2 m/s. Relativní vlhkost by se měla pohybovat v rozmezí 30-65 %. Hodnoty jsou přehledněji zobrazeny v Tabulka 4. [17]

Typ prostoru	Výsledná teplota			Rychlost proudění	Relativní vlhkost
	t <sub>g min</sub> (°C)	t <sub>g opt</sub> (°C)	t <sub>g max</sub> (°C)	v <sub>a</sub> (m.s <sup>-1</sup> )	RH (%)
Učebny, pracovny, místnosti určené k dlouhodobému pobytu	20	22 ±2	28	0,1-0,2	30-65
Tělocvičny	18	20 ±2	28	0,1-0,2	30-65
Šatny	20	22 ±2	28	0,1-0,2	30-65
Sprchy	24	-	-	-	-
Záchody	18	-	-	0,1-0,2	30-65
Chodby	18			0,1-0,2	30-65

Tabulka 4: Celoročně přípustné parametry mikroklimatických podmínek [17]

## 2.3 Požadavky na kvalitu vzduchu

Hlavním kritériem pro kvalitu vzduchu v místnosti je tzv. Pettenkoferovo kritérium, stanovené již roku 1877 Maxem Josephem von Pettenkoferem. Ten prokázal, že sledováním koncentrace CO<sub>2</sub> lze dobře vystihnout kvalitu větrání. Jako maximální přípustnou stanovil koncentraci CO<sub>2</sub> na 1000 ppm. Z toho vyplývá i dávka čerstvého vzduchu na osobu 25 m<sup>3</sup>/h, případně minimální intenzita větrání 0,5 hod<sup>-1</sup>. V tomto ohledu

je česká legislativa „mírnější“ a vyhláškou č. 268/2009 Sb. „O technických požadavcích na stavby“ stanovuje maximální možnou míru koncentrace CO<sub>2</sub> na 1500 ppm což přibližně odpovídá 18 m<sup>3</sup>/h na osobu. [18]

Hodnot přesahujících legislativou stanovených 1500 ppm není těžké dosáhnout. Uvádí se, že v ložnici se dvěma spícími osobami koncentrace CO<sub>2</sub> v ranních hodinách běžně dosahuje 3000 ppm. Za běžnou venkovní koncentraci se považuje hodnota mezi 300 až 400 ppm. V městském prostředí přibližně 450 ppm. Vzduch vydechnutý dospělým člověkem může přesahovat 50 000 ppm. [19]

Studie provedená v roce 2015 na 17 českých školách všech úrovní (od mateřské po vysokou) poukázala na tristní koncentrace CO<sub>2</sub> během výuky. Tyto koncentrace daleko přesahují limity. Studie prokázala nedostatečnost přirozeného větrání, danou zejména nynější těsností budov. [19]

Pro doplnění uvádím v účinky CO<sub>2</sub> na lidský organismus.

<b>Účinky CO<sub>2</sub> na lidský organismus</b>	
cca 350 ppm	úroveň venkovního prostředí
do 1000 ppm	doporučená úroveň CO <sub>2</sub> ve vnitřních prostorech
1200-1500 ppm	doporučená maximální úroveň CO <sub>2</sub> ve vnitřních prostorech
1000-2000 ppm	nastávají příznaky únavy a snižování koncentrace
2000-5000 ppm	nastávají možné bolesti hlavy
5000 ppm	maximální bezpečná koncentrace bez zdravotních rizik
> 5000 ppm	nevolnost a zvýšený tep
> 15000 ppm	dýchací potíže
> 40000 ppm	možná ztráta vědomí

Tabulka 5: Účinky CO<sub>2</sub> na lidský organismus [20]

## 2.4 Hluk a vibrace

Pohodu člověka v prostředí ovlivňují i hluk a vibrace, které ho obklopují. V oblasti ventilace bude pravděpodobnějším obtěžováním hlukem. Ten bude způsoben zejména chodem ventilátorů, ale v určitých případech i zvukem šířícím se vzduchovody z okolních místností (zejména při špatně navrženém systému potrubí) nebo venkovního prostředí.

Limity, týkající se hluku a vibrací, jsou stanoveny nařízením vlády č. 272/2011 Sb. „*O ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*“. Hlavní sledovanou veličinou je ekvivalentní hladina akustického tlaku označována jako  $L_{Aeq}$ .

Ekvivalentní hladina akustického tlaku se vztahuje k určitému časovému intervalu (např. 8 hodin pracovní doby) a je definována jako hladina ustáleného akustického tlaku zvuku, který by měl v daném časovém intervalu stejný energetický obsah, tudíž pravděpodobně stejné škodlivé účinky, jako zvuk proměnný. Stanovuje se jako energetický průměr z hladin akustického tlaku vyskytujících se v daném časovém intervalu.

Sleduje se také, zda-li měřený hluk obsahuje tzv. tónovou složku. Hlukem s tónovými složkami se rozumí hluk, v jehož kmitočtovém spektru je hladina akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu, případně i ve dvou bezprostředně sousedících třetinooktávových pásmech, o více než 5 dB vyšší než hladiny akustického tlaku v obou sousedních třetinooktávových pásmech a v pásmu kmitočtu 10 Hz až 160 Hz je ekvivalentní hladina akustického tlaku v tomto třetinooktávovém pásmu vyšší než hladina prahu slyšení stanovená pro toto kmitočtové pásmo v příloze č. 1 k nařízení vlády č. 272/2011 Sb (viz Tabulka 6); hlukem s tónovými složkami je vždy hudba nebo zpěv; pokud nelze hluk s tónovými složkami identifikovat na základě uvedené definice, lze použít definici vycházející z úzkopásmové analýzy. [21]

<b><math>f_t</math> [Hz]</b>	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
<b><math>L_{PS}</math> [dB]</b>	92	87	83	74	64	56	49	43	42	40	38	36	34

Tabulka 6: Hladiny prahu slyšení stanovené pro frekvence 10 až 160 Hz. [21]

Působení hluku na člověka neovlivňuje pouze hladina v dB ale také charakter hluku. Proto jsou limity stanoveny jak pro ustálený či proměnný hluk, tak také pro impulzní, vysokofrekvenční hluk případně pro ultrazvuk či infrazvuk.

Pro chráněné vnitřní prostory staveb stanovuje vyhláška č. 272/2011 Sb. základní ekvivalentní hladinu akustického tlaku  $L_{Aeq,T}$  na 40 dB. Tato základní hodnota

je pak korigována v závislosti na druhu chráněného prostoru a denní a noční době. Hodnoty i včetně započtené korekce jsou uvedeny v Tabulka 7.

Chráněným vnitřním prostorem stavby se rozumí obytné místnosti, místnosti ve školách a místnosti ve zdravotnických zařízeních.

Chráněný prostor	Doba pobytu	1	2	3
Nemocniční pokoje	6.00-22.00	40	35	–
	22.00-6.00	25	20	–
	7.00-21.00*	–	–	55
Lékařské vyšetřovny, ordinace	po dobu používání 7.00-21.00*	35	30	– 50
Obytné místnosti	6.00-22.00	40	35	–
	22.00-6.00	30	25	–
	7.00-21.00*	–	–	55
Přednáškové síně, učebny a pobytové místnosti škol, jeslí a staveb pro předškolní a školní výchovu a vzdělávání	po dobu používání 7.00-21.00*	45	40	– 60
<p>1) Platí pro hluk bez tónových složek a hluk bez informačního charakteru pronikající vzduchem zvenčí a pro hluk ze stavební činnosti uvnitř objektu. Dále platí pro hluk šířící se ze zdrojů uvnitř objektu. Za hluk ze zdrojů uvnitř objektu, s výjimkou hluku ze stavební činnosti, se pokládá i hluk ze zdrojů umístěných mimo tento objekt, který do tohoto objektu proniká jiným způsobem než vzduchem, zejména konstrukcemi nebo podložími.</p> <p>2) Platí pro hluk s tónovými složkami, s výjimkou hluku z dopravy na pozemních komunikacích, a hluk s výrazně informačním charakterem.</p> <p>3) Platí pro hluk ze stavební činnosti uvnitř objektu, platí pouze v pracovních dnech v uvedeném časovém rozmezí (*).</p>				

Tabulka 7: Limitní hodnoty hluku v chráněném vnitřním prostoru se započítanou korekcí [22]

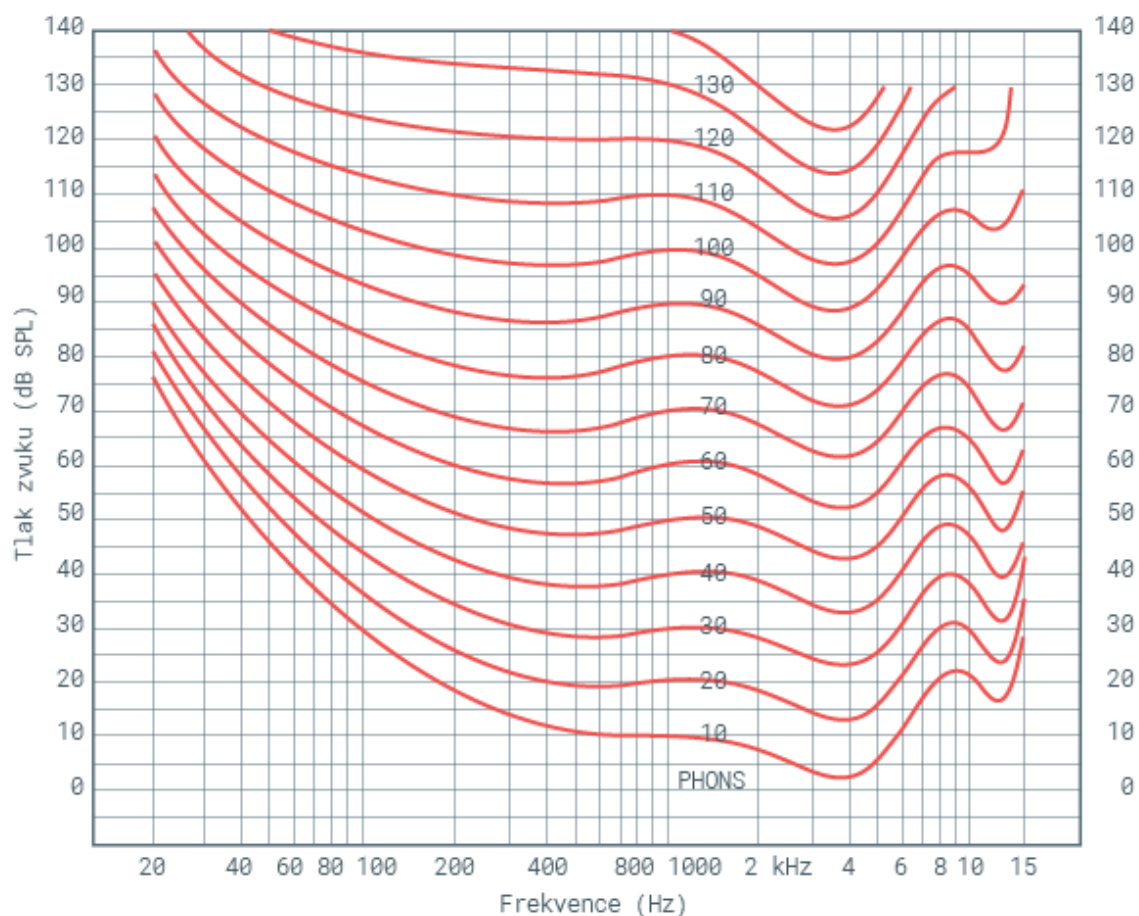
Měření hladiny akustického tlaku se provádí zvukoměrem, který se skládá z mikrofону, předzesilovače, váhovacích filtrů, zesilovače a časového váhování.

Mikrofon je převodník akustického tlaku na elektrické napětí, obvykle fungující na kapacitním principu. Působením akustického tlaku se mění vzdálenost  $d$  mezi pevnou a pohyblivou elektrodou (membrána mikrofону). Při udržení konstantního náboje  $Q$ , dochází, na elektrodách mezi kterými je dielektrikum o permitivitě  $\varepsilon$ , ke změně napětí  $U$  dle vztahu  $U = \frac{Q}{\varepsilon \cdot \frac{S}{d}}$ .

Změna napětí jsou řádově mV při změně tlaku o 1 Pa – takto se udává i citlivost mikrofону.

Důležitou součástí jsou také váhovací filtry. Ty přizpůsobují výsledné hodnoty fyziologii lidského sluchu, protože lidský sluch je různě citlivý na různé frekvence zvuku. To popisují tzv. křivky stejné hlasitosti. Váhovací filtry jsou inverzní funkcí k těmto křivkám.

Existují 3 základní filtry – A, C a D. Váhovací filtr A je inverzní vůči křivkám stejné hlasitosti při 40 dB a používá se např. pro měření plnění hygienických norem. V případě potřeby měření vyšších hladin hluku, se užívá váhovací filtr C (např. na koncertech). Váhovací filtr D je určen pro měření hluku letecké dopravy.



Obr. 8: Křivky stejné hlasitosti [23]

Na závěr této kapitoly bych rád zmínil, že větrání je činnost energeticky náročná a jde proti trendu snižování spotřeby. I přesto je nutné zaručit nadřazenost hygienických a provozních požadavků před těmi energetickými. (13)

## 3 Jednotka WHISPER AIR

### 3.1 Základní popis jednotky WHISPER AIR

Decentralizovaná rekuperační jednotka WHISPER AIR od firmy 2VV je určena k instalacím ve stávajících budovách, zejména je pak určena pro školy a kanceláře. Výrobce nabízí 3 provedení podle množství vzduchu, které jednotka dokáže vyměnit za hodinu provozu. Jednotka umístěná v EK-319 na Katedře elektroenergetiky a ekologie je schopná vyměnit 700 m<sup>3</sup>/h vzduchu při nominálním výkonu, v režimu Boost až 900 m<sup>3</sup>/h. Výrobce dále nabízí varianty o nominálním výkonu 400 a 1000 m<sup>3</sup>/h.

Zařízení je navrženo pro provoz v interiéru v rozmezí teplot 5 až 40 °C a relativní vlhkosti do 90 %. Teplota čerstvého nasávaného vzduchu by se měla pohybovat v rozmezí -15 až 40 °C.

Jednotka má několik provozních režimů. V režimu DCV (demand controlled ventilation) je intenzita větrání řízena signálem čidla kvality vzduchu (AQS). V menu jednotky lze nastavit, zda má čidlo reagovat na určitou hladinu CO<sub>2</sub>, relativní vlhkosti nebo VOC (těkavé organické látky). Dalším režimem je CAV (constant air volume flow) při kterém jednotka udržuje konstantní průtok vzduchu nastavený uživatelem. Provoz lze nastavit i v tzv. týdenním nebo ročním režimu a naplánovat tak provoz dopředu ve stanovený čas.

Režim Freecooling slouží pro větrání během noci v letním období. Jednotka vhání chladnější venkovní vzduch do místnosti bez použití výměníku – ten lze obejít bypassem. Tímto lze místnost v letních měsících „předchladit“.

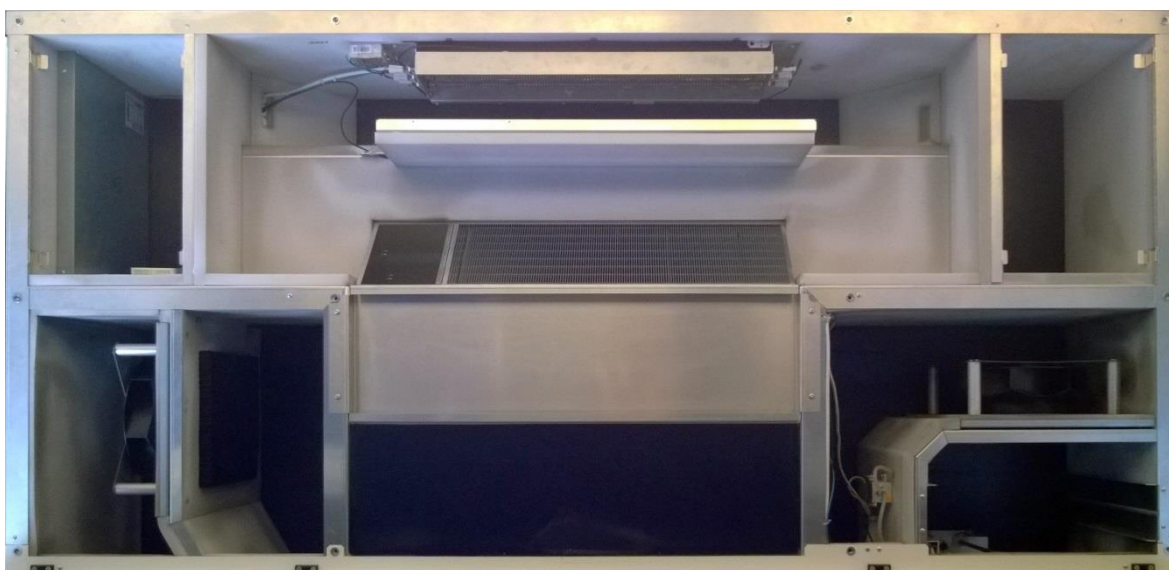
Vzduchovody jsou vybaveny filtrem vzduchu, zabraňujícím šíření nečistot a zápachu do místnosti. K jednotce lze také připojit pohybové nebo požární čidlo, a jednotku ovládat na základně informací z těchto čidel. Např. při sepnutí požárního čidla je jednotka schopná odvádět kouř z místnosti a vhánět dovnitř čerstvý vzduch.

Ovládání a zobrazování dat z jednotky je zajištěno dotykovým displejem, který lze umístit libovolně po místnosti. Výrobce udává hlučnost zařízení při nominálním průtoku vzduchu je 35 dB.

### 3.1.2 Výměník

Srdcem jednotky je hliníkový protiproudý výměník s udávaným teplotním faktorem až 90 %. Odpadní vzduch z místnosti, nasávaný průduchy umístěnými na obou stranách spodní části jednotky, vstupuje do výměníku ze shora. Po předání tepla přívodnímu vzduchu proudí odpadní vzduch ven z místnosti přes klapku zamezující průtoku vzduchu v opačném směru.

Ihned za výstupem z výměníku směrem do místnosti je umístěná přepážka zpomalující proudění tak aby nevznikal průvan. Jak již bylo zmíněno, výměník lze ze strany venkovního vzduchu zcela obejít bypassem.



Obr. 9: Pohled na odkrytou spodní část rekuperační jednotky

### 3.1.3 Pohon ventilátoru

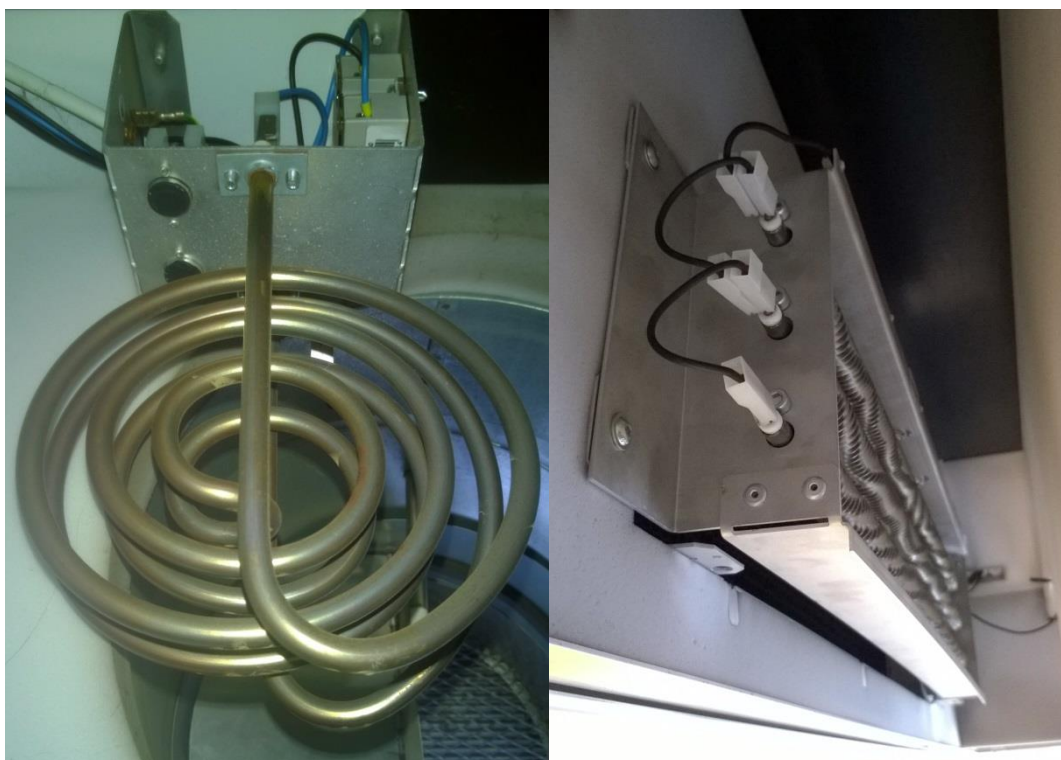
Průtok vzduchu obstarávají dva ventilátory poháněné EC motory od firmy Ebm-papst. EC motor (electronically commutated) je stejnosměrný motor, u něhož je mechanický komutátor nahrazen elektronikou ovládající polaritu napětí na cívkách statoru. Vyznačují se tichým a úsporným provozem, díky tomu se s oblibou využívají právě ve vzduchotechnice.

Motor použitý v jednotce má výkon 170 W a podle požadovaného průtoku odebírá až 1,40 A ze sítě 230 V / 50 Hz. Maximální otáčky činní 2 510 ot./min. Je řízen napěťovým signálem 0 – 10V. Závislost výkonu na průtoku vzduchu je zobrazena na Graf 1 v kapitole 5.2.

### 3.1.4 Elektrický přehřev a dohřev

Jednotka je vybavena elektrickým přehřevem venkovního vzduchu zabraňujícím vzniku námrazy ve vzduchovodech. Přehřev je jednofázový s výkonem 2000 W, maximální proudový odběr činný 8,7 A.

Dohřev vzduchu má o něco vyšší parametry a to 2 250 W a 9,78 A při 230 V. Výrobce nabízí i variantu s vodním dohřevem místo elektrického. Nejlevnější varianta je zcela bez ohřevu vzduchu.



Obr. 10: Elektrický přehřev a dohřev venkovního vzduchu

Vzhledem ke spotřebě je přehřev a dohřev zapojený na vlastní fázi L2 a L3. Na fázi L1 je připojen pohon motorů a zbytek elektroniky jednotky.

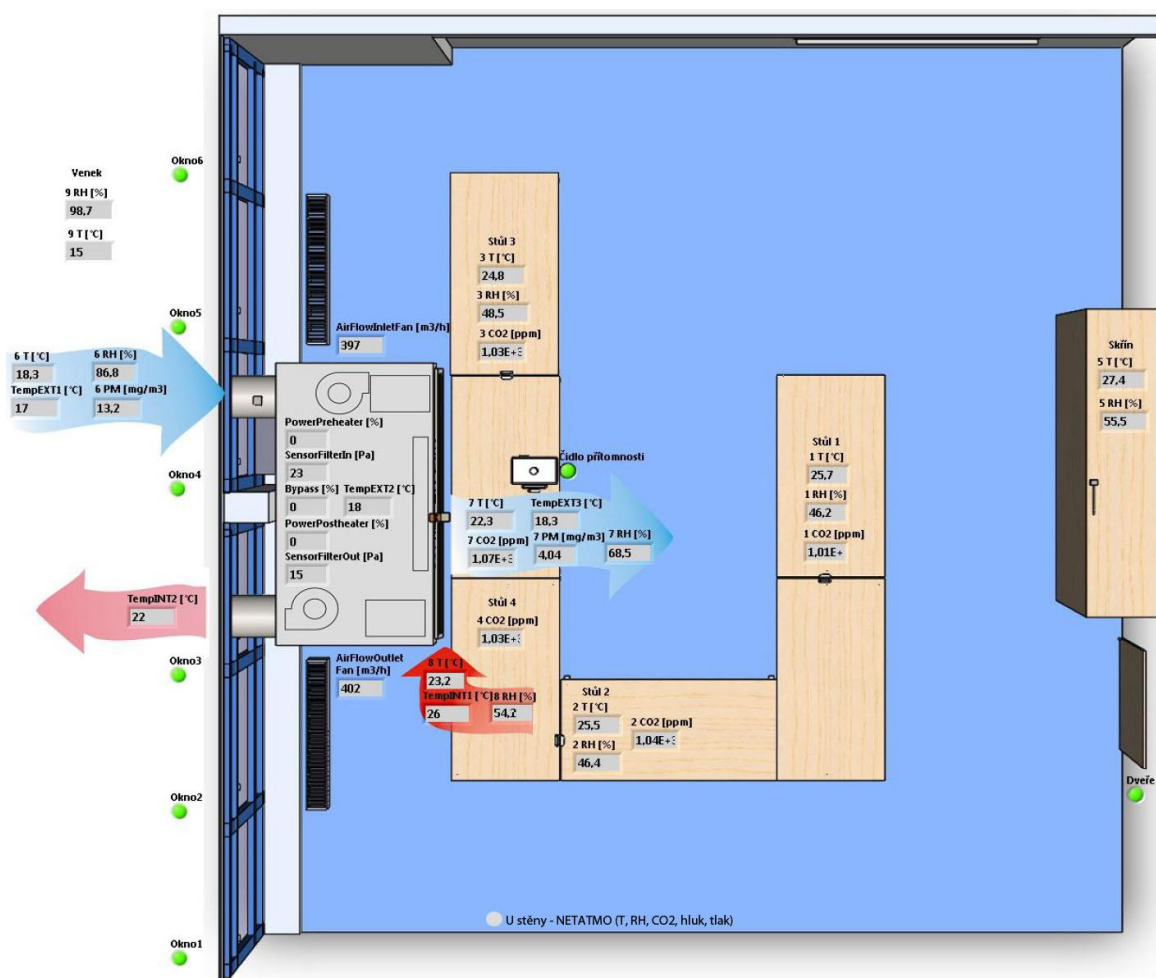


## 4 Sběr dat

Pro zhodnocení provozu jednotky a kvality vzduchu v místnosti je třeba sledovat velké množství parametrů. Celkem systém vytvořený pro sběr dat zaznamenává 114 hodnot, každou v intervalu jedné minuty. Některé parametry jsou získávané přímo jednotkou, např.: provozní režim a nastavení, průtok, teplota, výkon předehřevu / dohřevu.

Další část naměřených hodnot se týká sledování kvality vzduchu. K tomu jsou v místnosti EK-319 instalována čidla teploty, relativní vlhkosti a koncentrace CO<sub>2</sub>. Čidla jsou umístěna na stolech (3x T+RH+CO<sub>2</sub> a 1x CO<sub>2</sub> samostatně) a na skříni u vstupu do místnosti (T+RH). Parametry a princip použitých čidel zmíním v následujících podkapitolách.

U oken a dveří jsou instalovány magnetické kontakty, reagující na otevření oken a dveří. Na pohyb osob reaguje také čidlo přítomnosti. Sledovány jsou i parametry venkovního vzduchu – teplota, vlhkost a také prašnost.



Obr. 11: Rozmístění čidel v místnosti EK-319

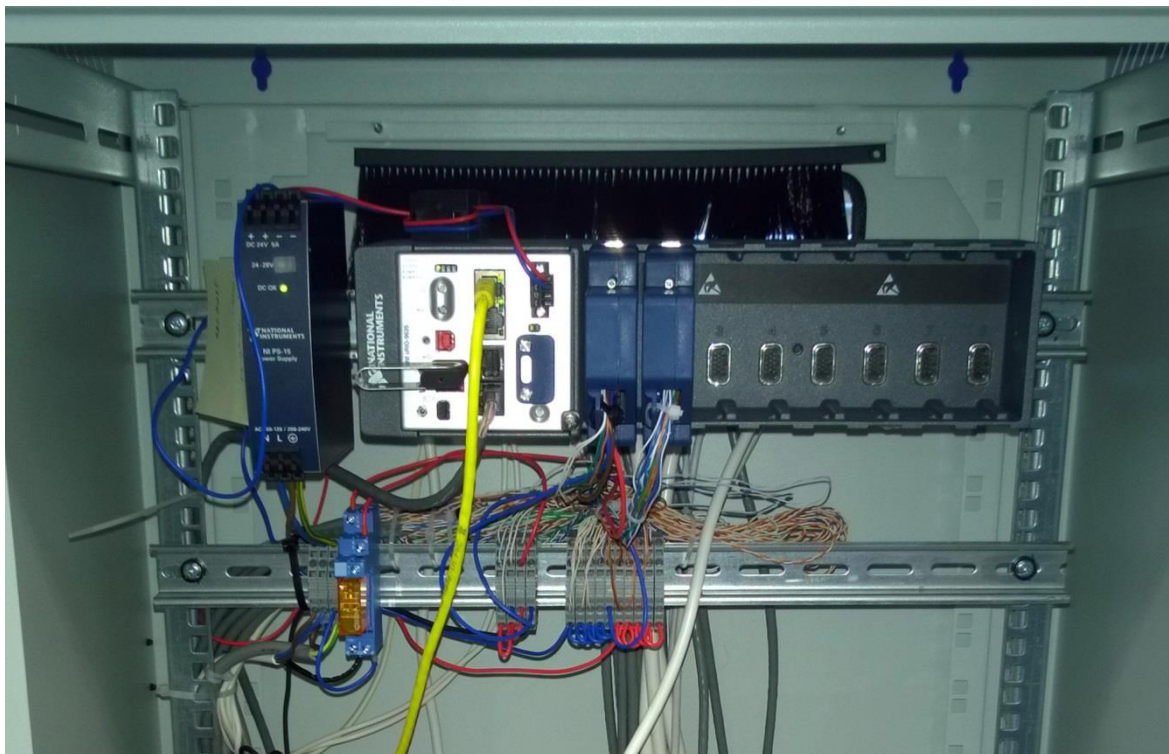
Ke sledování elektrických veličin je jednotka připojena přes analyzátor sítě Nemo 96 HDLe od firmy IME. Měří se jednofázové napětí a proud, činný a jalový výkon, frekvence a činitel zkreslení THD. Z třífázových veličin poté činný, jalový, zdánlivý výkon, účinník a spotřebovaná činná i jalová energie.



Obr. 12: Analyzátor sítě [24]

Sběr, komunikaci s jednotkou i analyzátozem sítě, vizualizaci a ukládání dat zajišťuje programovatelný řídicí kontroler C-RIO od National Instruments. Komunikace s rekuperační jednotkou je zajištěna přes komunikační protokol Modbus TCP/IP, což umožňuje čtení dat přímo z řídicího systému jednotky. Komunikace s analyzátozem sítě je skrze Modbus RTU. Veškerá data se ukládají do textového souboru.

C-RIO je naprogramováno softwarem LabVIEW a doplněno měřicími kartami ke zpracování analogových signálů 0-10 V (karta NI 9205) a digitálních signálů (karta NI 9035). Čidla jsou úmyslně vybrána s výstupem 0-10 V tak, aby nebylo zapotřebí dalších měřicích karet v řídicím kontroleru. Napájení (24 V) a signál z čidel (0-10 V) je veden UTP kabelem.



Obr. 13: C-Rio s kartami

#### 4.1 Teplotní a vlhkostní čidlo

Vnitřní čidlo TTHI od firmy Eatec pracuje na principu změny relativní permitivity dielektrika na teplotě a vlhkosti a tím změny kapacity mezi elektrodami. Výhodou těchto čidel je lineární závislost na teplotě / vlhkosti a dobrá citlivost.



Obr. 14: Vnitřní čidlo teploty a vlhkosti (vpravo) na společném držáku s CO<sub>2</sub> čidlem

Čidlo pracuje v rozsahu 0-98 % RH a 0-50 °C. Udávaná přesnost je  $\pm 2 \% RH + 2 \% FS$  pro čidlo vlhkosti a  $\pm 0,3 ^\circ C + 1 \% FS$  pro teplotní čidlo. Výstup čidla je 0 - 10 V. Napájení je 12 - 34 V AC/DC. [25]

Venkovní resp. potrubní provedení čidla pod označením TTHO resp. TTHD má stejné parametry, pouze se vyznačuje vyšším stupněm krytí IP65, jiným konstrukčním uspořádáním a širším rozmezím provozních teplot -30 až 70 °C. TTHD je osazeno v přívodním potrubí a na výdechu do místnosti. Další čidlo je umístěno na skříni na protější stěně místnosti. [25]

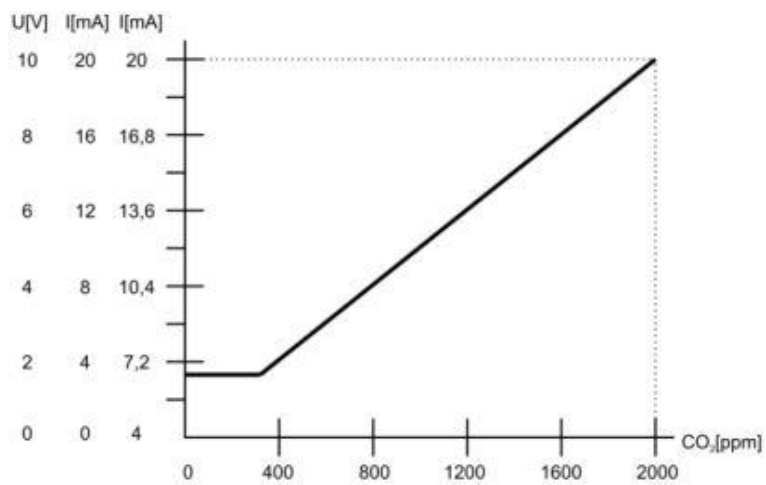
#### 4.2 Vnitřní čidlo CO<sub>2</sub>

Čidlo koncentrace CO<sub>2</sub> od firmy 2VV pracuje na principu pohlcení IR záření v závislosti na koncentraci CO<sub>2</sub>. Pohlcené záření se projeví nárůstem teploty/tlaku v měřící komůrce tato změna je pak sledována. Tento princip zaručuje dobrou časovou stálost měření.



Obr. 15: Vnitřní CO<sub>2</sub> čidlo s aktivní LED signalizací

Čidlo měří v rozsahu 370 - 2000 ppm s takřka lineární závislostí (viz Obr. 13). Výstupem je signál 0 - 10 V. Napájení 12 - 40 V DC resp. 15 - 30 V AC. [26]



Obr. 16: Citlivost čidla CO<sub>2</sub> [26]

## 5 Vyhodnocení dat

Z více než 55 000 000 hodnot získaných v rozmezí 31.1.2018 až 25.3.2019 jsem v následujících podkapitolách vyhodnotil klíčové parametry jednotky a její vliv na kvalitu prostředí v místnosti.

Data jsou systémem ukládána v podobě textových souborů. Pro vyhodnocení bylo nejprve nutné tyto soubory převést do jednoho, tak aby data byla seřazena kontinuálně za sebou. Za tímto účelem bylo nutné vytvořit v jazyku VBA několik maker, které nejen seřadí soubory za sebe, ale také např. převedou datum z US formátu na evropský, zamění čárky za tečku apod. Samotné vyhodnocování naměřených dat pak probíhalo v MS Excel 2010. Průběhy veličin byly vykreslovány pomocí grafu kontingenční tabulky.

### 5.1 Měření v EK-419

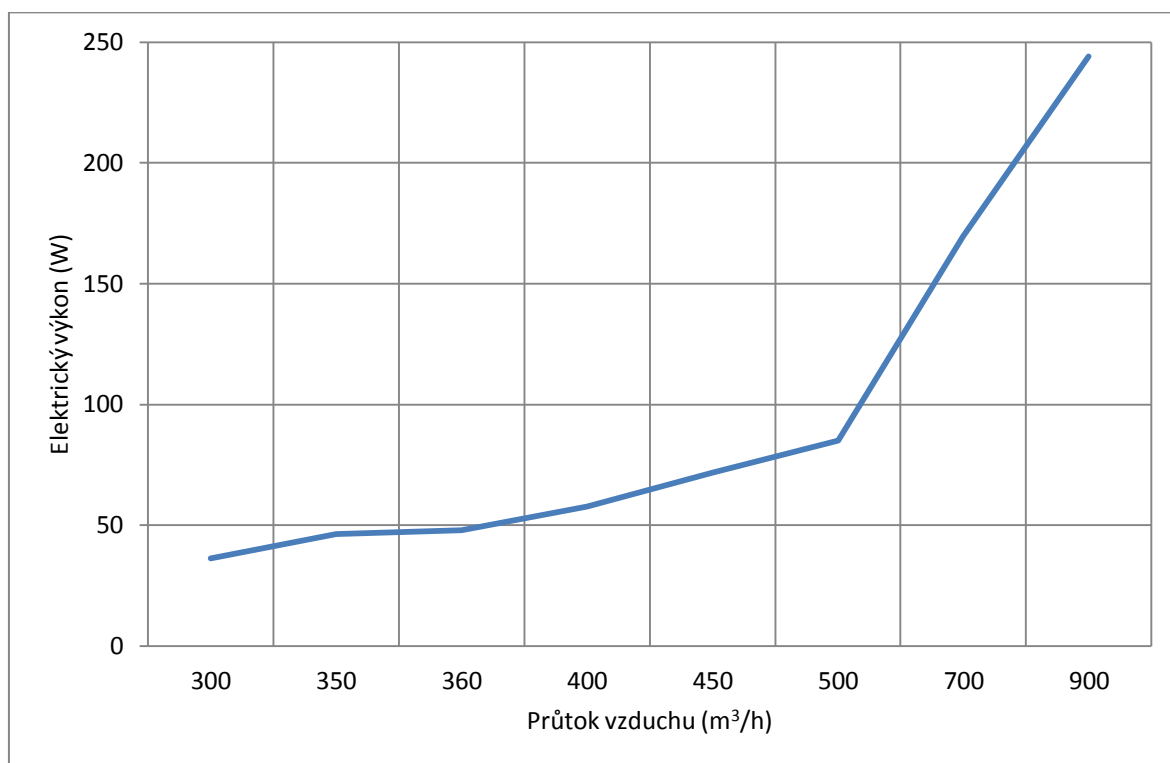
Během prosince 2018 byl umístěn do podobně situované místnosti EK-419 další měřicí systém - Netatmo. Systém Netatmo se skládá ze tří čidel měřících mimo koncentraci CO<sub>2</sub> také relativní vlhkost a teplotu. Čtvrté čidlo, sloužící zároveň jako řídicí jednotka, měří navíc atmosférický tlak a hluk. Získaná data jsou bezdrátově nahrávána na server a uživatel si tato data může zobrazit v reálném čase.

Místnost se nachází na Katedře technologií a měření (KET) a v místnosti není instalována žádná ventilační jednotka. Tím vznikla možnost pro porovnání údajů z těchto dvou systémů, a díky tomu si lze udělat představu o rozdílu kvality vnitřního prostředí v místnosti s nucenou a přirozenou ventilací. Obě místnosti jsou stejných rozměrů, konkrétně 6,2x7,0x3,6 m. Objem vzduchu v místnosti činí 156,2 m<sup>3</sup>. Měřicí systém Netatmo byl po nějakou dobu umístěn i v EK-319. To z důvodu ověření odchylek systému Netatmo a externích čidel. Ukázalo se, že hodnoty získané externími čidly se téměř shodují s těmi získanými Netatmem.

### 5.2 Spotřeba elektrické energie

Jednotka je vybavena elektrickým předehřevem i dohřevem vzduchu o relativně velkém výkonu. Maximální výkon předehřevu činí 2 000 W a dohřevu 2 250 W. To v závislosti na provozu může mít velký dopad na spotřebu jednotky zejména v zimním období. Spotřebu samozřejmě ovlivňuje i chod ventilátorů, ten je však v porovnání s předehřevem a dohřevem zanedbatelný.

Závislost činného výkonu ventilátorů na průtoku vzduchu zobrazuje Graf 1.



Graf 1: Závislost činného výkonu na průtoku vzduchu

Jednotka v průběhu roku běžela v několika provozních režimech. Z počátku roku běžela na režim CAV. Poté v období od 8.2.2018 do 17.3.2018 kontrolovala hladinu CO<sub>2</sub> v režimu DCV, který běžel kontinuálně celý den. Stejně jako v předchozím CAV režimu, byl průtok vzduchu nastaven na minimální, tedy 300 m<sup>3</sup>/h. Z hlediska chodu ventilátorů a jejich spotřeby, nenastal v těchto obdobích rozdíl.

Možný rozdíl ve spotřebě ventilátorů mohl nastat v období 17.3.2018 až 7.6.2018, kdy jednotka běžela opět na DCV režim, tentokrát ale časově spínaný. Jednotka tedy běžela pouze ve zvolený čas opět na minimální průtok, a během noci byla zcela vypnutá. Toto má samozřejmě příznivý dopad na spotřebu.

Nejdelší část roku od 7.6.2018 do počátku prosince 2018 běžela jednotka opět na CAV režim po celý den i noc. Tento režim měl v zimním období největší dopad na spotřebu. Jednak jsou ventilátory nepřetržitě v provozu, ale díky chladnějšímu venkovnímu vzduchu se ještě spíná předehřev a dohřev. Dopadu ohřevu vzduchu na spotřebu se věnují dále v této kapitole.

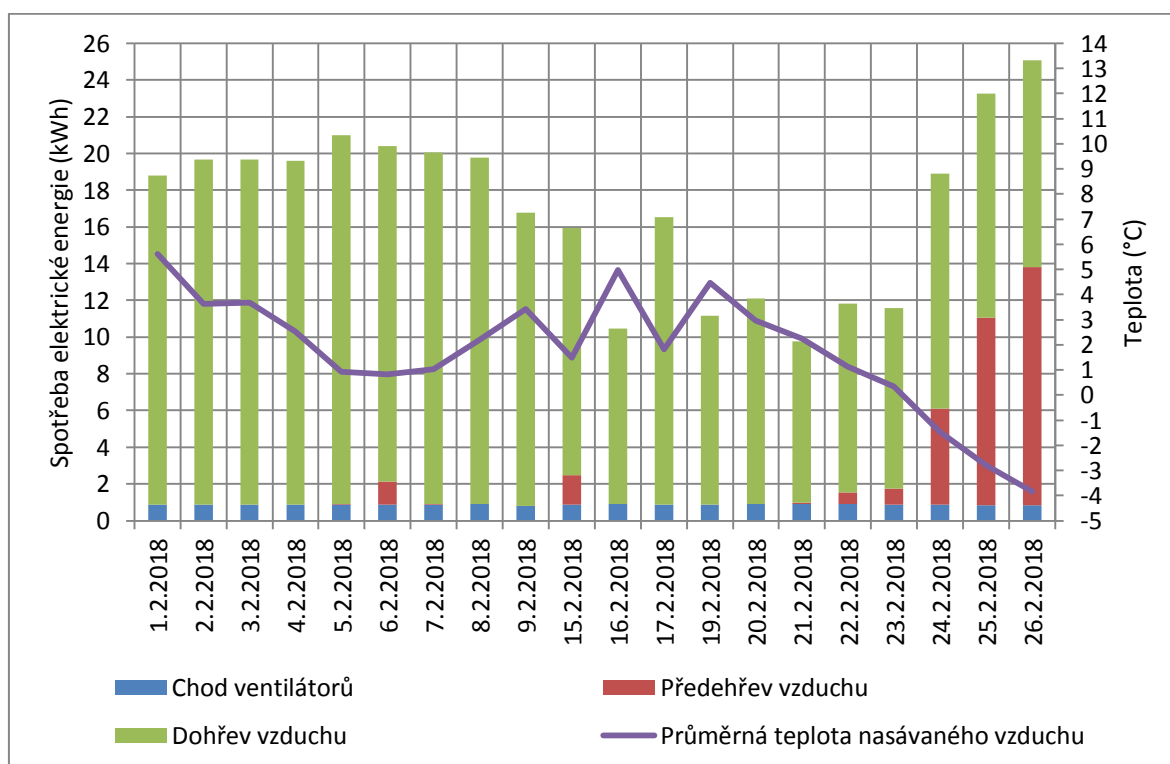
Jako poslední režim byl od 17.12.2018 použit DCV režim s 10 minutovým „prodýcháváním“. Tento režim spíná jednotku v 10 minutových intervalech s průtokem

500 m<sup>3</sup>/h. Pokud nevyhodnotí vyšší koncentraci CO<sub>2</sub>, jednotku opět vypne. Z hlediska doby provozu během dne má tento mod nejpříznivější dopad na spotřebu.

Denní spotřebu v zimních měsících dokazují grafy za únor 2018 a leden 2019. Důvodem pro zvolení jiných měsíců v každém roce je fakt, že venkovní teploty v únoru letošního roku nedosahovali v průměru tak nízkých hodnot jako v loňském roce. Přesto, že teploty v lednu letošního roku byly stále průměrně vyšší než v únoru roku 2018, lze vidět řádový rozdíl ve spotřebě a to ve prospěch ledna 2019. To je dáno zvoleným režimem jednotky.

### 5.2.1 Provoz v zimních měsících, CAV vs. DCV režim

Na Graf 2 je zobrazena denní spotřeba jednotky v únoru 2018. Zobrazeny jsou pouze dny bez výpadků. V prvním týdnu neklesla spotřeba pod 18 kWh/den. Nejvyšší spotřeby bylo dosaženo 26.2.2018 a to 25,05 kWh. Od 24.2.2018 je dobře patrná zvýšená spotřeba sepnutím předehřevu při průměrné denní teplotě pod 0 °C.



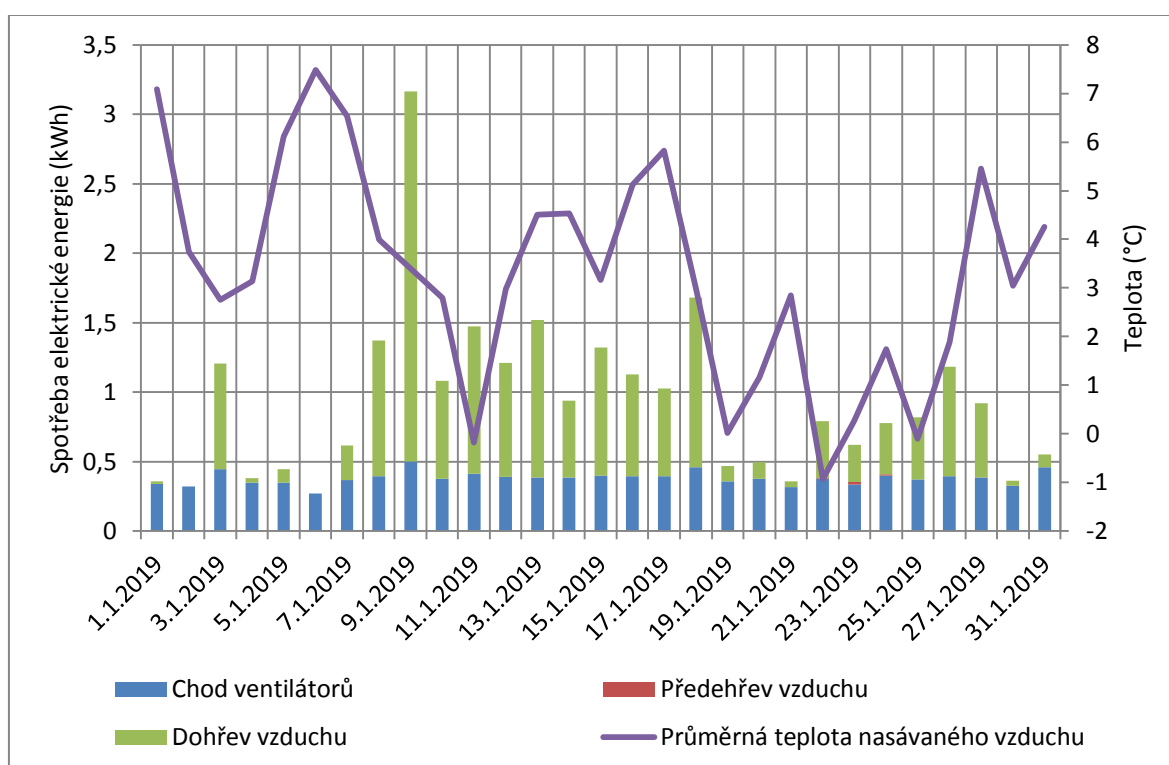
Graf 2: Denní spotřeba rekuperační jednotky v únoru 2018 (režim CAV)

Jednotka běžela nejprve v režimu CAV a od 8.2.2018 v režimu DCV. Nicméně stále po celý den udržovala konstantní průtok vzduchu. Případné navýšení průtoku v důsledku vyšší koncentrace CO<sub>2</sub> (viz Graf 11 na straně 57) v režimu DCV má, v poměru k celkové době provozu, zanedbatelný vliv.



Režim udržování minimálního konstantního průtoku, který činí 300 m<sup>3</sup>/h, má samozřejmě pozitivní vliv na hladinu CO<sub>2</sub>. V obdobích, kdy teplota venku klesá k nízkým hodnotám pod 0 °C, se ale musí vzduch přehřát případně i dohřát. To hlavně z důvodu ochrany výměníku před námrazou, a udržení vyhovující teploty uvnitř místnosti. Toto má pochopitelně dopad na spotřebu během dne. Negativní dopad to má také na relativní vlhkost uvnitř místnosti, kdy je do místnosti po celý den vháněn suchý vzduch a vlhkost tak padá hluboce pod minimálně doporučených 35 % (RH vháněného vzduchu se pohybuje i kolem 5 %). Vysoušení místnosti se podrobněji věnuji v kapitole 5.4.

Na Graf 3 je zobrazena spotřeba jednotky v lednu 2019. Opět jsou zobrazeny pouze dny bez výpadku. Už na první pohled dosahovala spotřeba jednotky pouze zlomku spotřeby v porovnání s úněm 2018. Lze také vidět, že se téměř nepoužíval přehřev vzduchu. Tento údaj ale může být zkreslen vyšší teplotou venkovního vzduchu v tomto období. Nejvyšší spotřeba byla 9.1.2019 a činila 3,2 kWh.



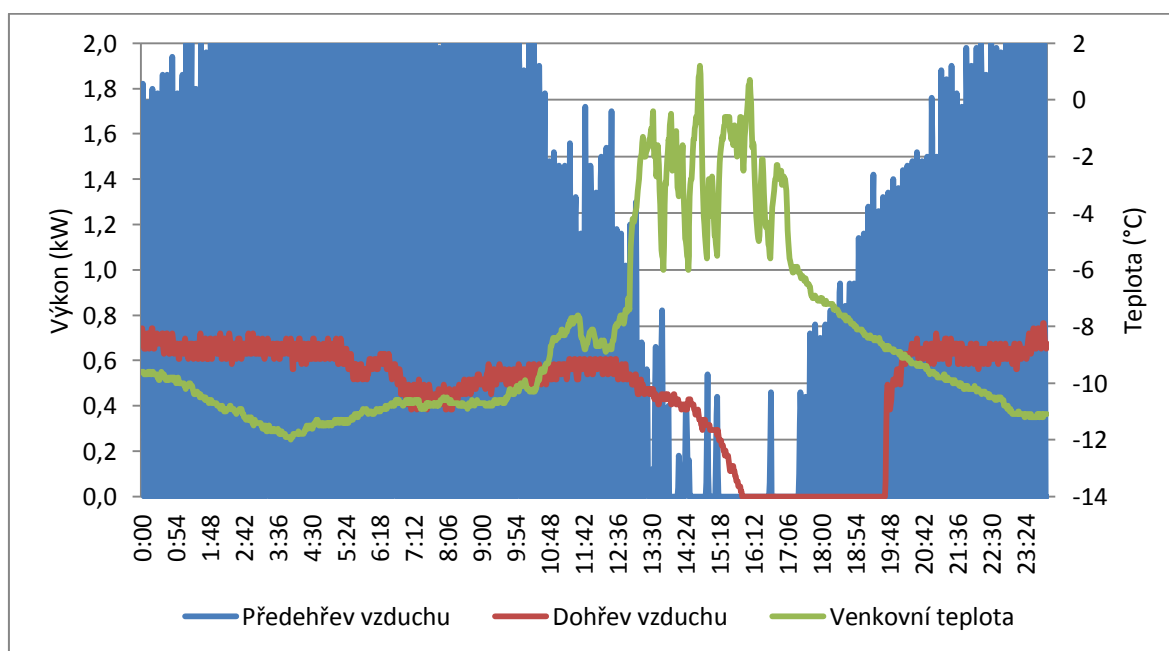
Graf 3: Denní spotřeba rekuperační jednotky v lednu 2019 (režim DCV)

Jednotka byla nastavená na režim DCV s „prodýcháváním“. Tento režim hlídá hladinu koncentrace CO<sub>2</sub> a to tak, že se jednotka sepne pouze jednou za 10 minut a to na výkon 500 m<sup>3</sup>/h, změří koncentraci CO<sub>2</sub> čidlem umístěným v jednotce a pokračuje ve větrání pouze při překročení hranice cca 600 ppm. Mimo tento interval je jednotka v režimu stand-by a vyjma vnitřní spotřeby elektroniky nespotebovává žádnou energii.

Tímto režimem je zabráněno „zbytečnému“ běhu jednotky během doby kdy v místnosti nikdo není a výrazně se tím snižuje spotřeba nutná na ohřev vzduchu i chodu ventilátorů. Tím že nedochází k tak časté výměně vzduchu, nedochází ani k „přechlazení“ výměníku. Také vzduch v místnosti si udrží vyšší vlhkost. Tento režim je tedy vhodné použít v chladnějších obdobích a udržet tak nižší spotřebu zařízení spolu s příhodnějším vlhkostním mikroklimatem.

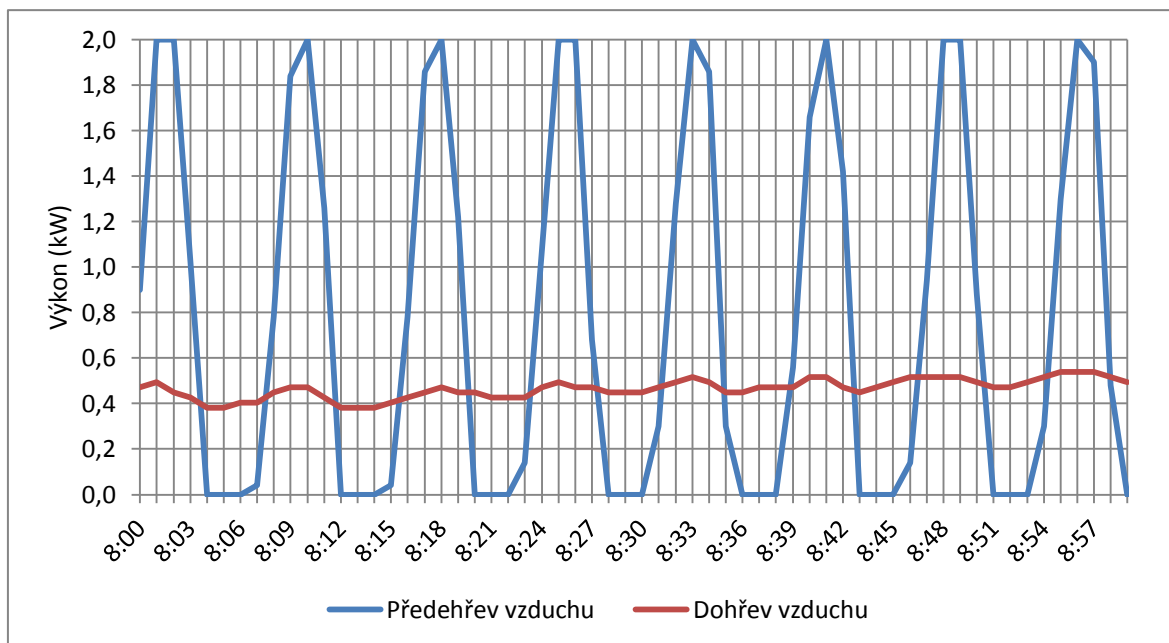
Pro představu rozdílu ve spotřebě, zde ještě uvedu Graf 4 a Graf 6. Grafy zobrazují výkon jednotky v průběhu dvou vybraných dnů. Venkovní teploty se v obou těchto dnech pohybovali v ranních hodinách okolo  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Graf 4 zobrazuje situaci 26.2.2018. Lze vidět, že přehřev běžel přibližně polovinu dne na maximální výkon (2 kW) z důvodu velmi nízkých teplot a neustálého chodu jednotky. Výkon dohřevu se převážnou většinu dne pohyboval okolo 600 W.

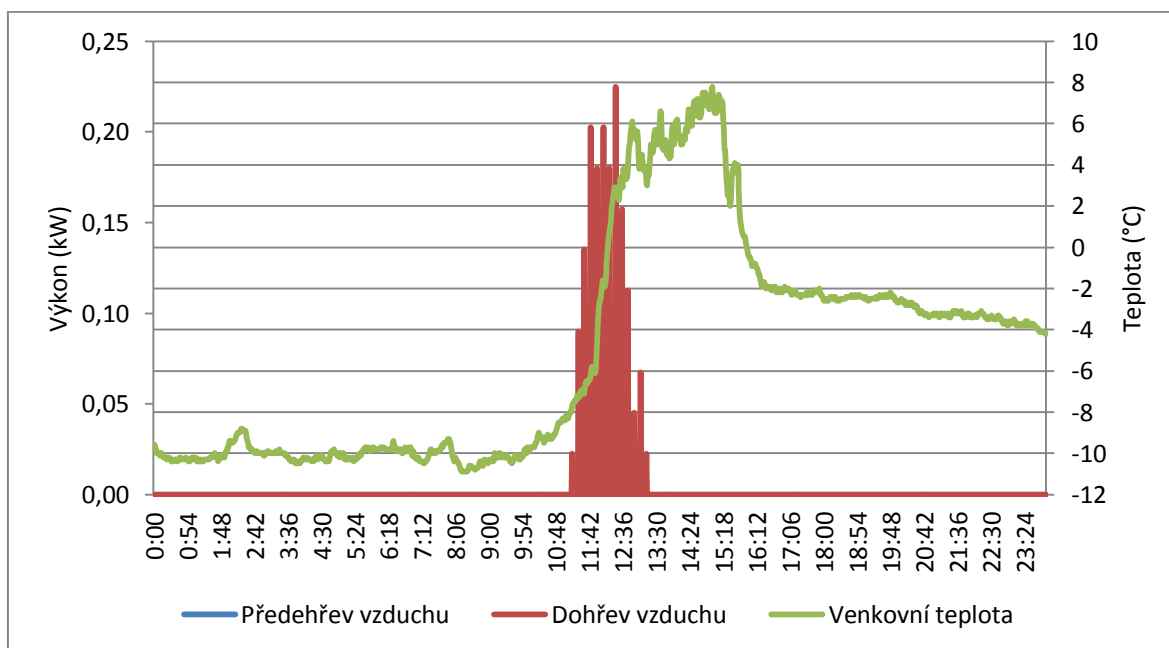


Graf 4: Vývoj výkonu během chladného dne 26.2.2018 (režim CAV)

Pravděpodobně z důvodu přehřátí topné spirály, se přehřev spíná v intervalech, což na Graf 4 způsobuje „zhuštěný“ průběh křivky. Výkon na dohřev vzduchu je dodáván kontinuálně. Časový průběh opakovaného spínání přehřevu je vidět na Graf 5.



Graf 5: Průběh spínání předehřevu a dohřevu vzduchu



Graf 6: Vývoj výkonu během chladného dne 5.2.2019 (režim DCV)

Na Graf 6 lze vidět rozdíl ve spotřebě během dne v závislosti na režimu. Graf zobrazuje stav 5.2.2019, kdy jednotka běžela v režimu DCV. Pouze v době 11:15 až 13:15 přihřívala vzduch s řádově nižším výkonem.

### 5.2.2 Provoz v letních měsících

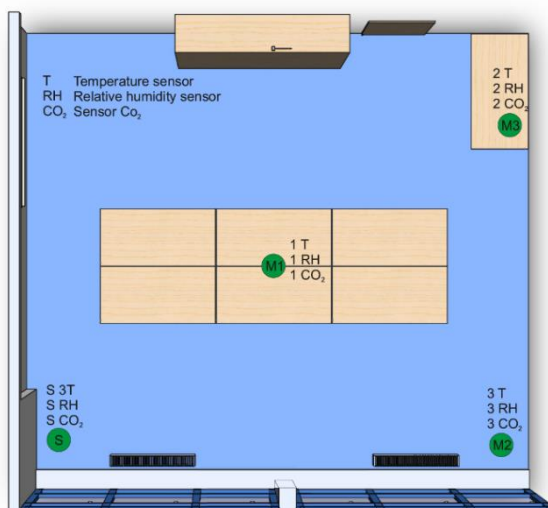
Jiná situace nastává v letních měsících, kdy nepřetržitý provoz jednotky bez nutnosti sepnutí ohřevu vzduchu naopak pomáhá místnost přes noc „předchladit“ a udržet tak příjemné mikroklima i během dne. Spotřeba je vyšší, než kdyby jednotka běžela jen nárazově (např. na režim DCV nebo provoz pouze v požadovaném čase) nicméně i při chodu na maximální výkon v režimu Freecooling, činí okamžitá spotřeba pouze cca 250 W.

Z výše uvedených grafů je patrný dopad zvoleného režimu na spotřebu jednotky. Režim CAV není příliš vhodný používat v zimním období kdy výrazným způsobem zvyšuje spotřebu, a to zároveň při zhoršení vnitřních podmínek, zejména relativní vlhkosti. Režim DCV je naopak pro toto období vhodný, lze díky němu udržet v místnosti dobrou kvalitu prostředí s poměrně nízkou spotřebou jednotky.

### 5.3 Koncentrace CO<sub>2</sub>

Hlavním úkolem rekuperační jednotky je udržení koncentrace CO<sub>2</sub> v únosných mezích. Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, hodnoty z EK-319 byli za účelem zjištění rozdílu kvality vzduchu, při použití nucené ventilace, porovnány s měřicím systémem Netatmo umístěném v EK-419. To je podrobněji popsáno v následující kapitole.

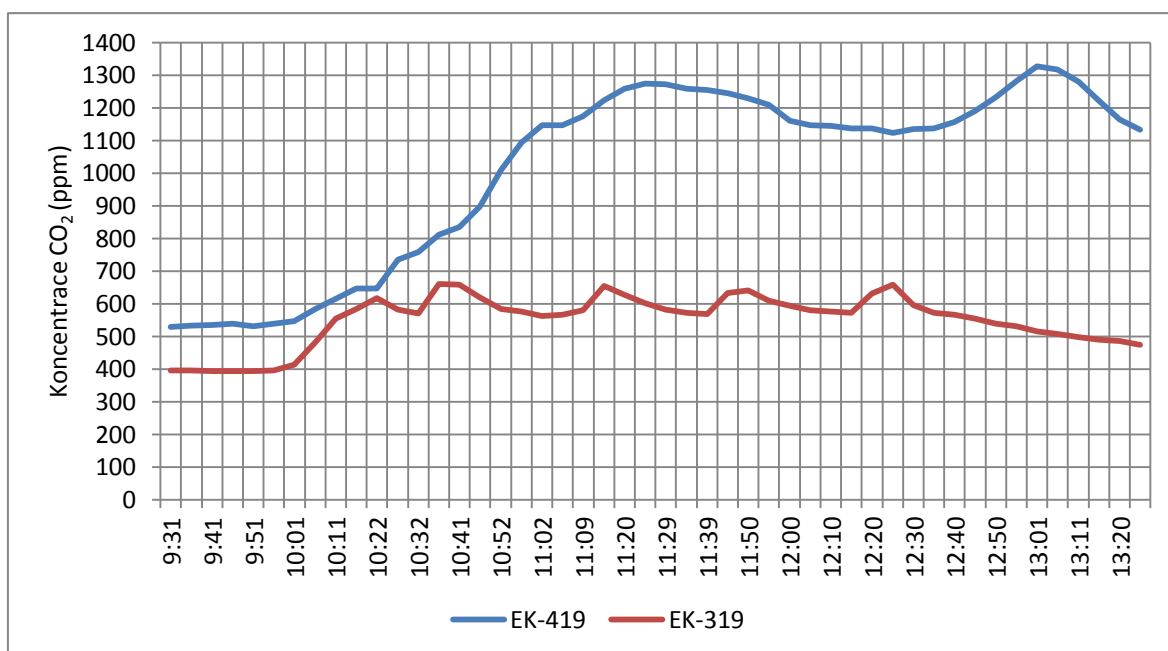
#### 5.3.1 Porovnání s EK-419



Obr. 17: Rozmístění čidel v EK-419

Z naměřených dat bylo pro porovnání vybráno několik dní, kdy se v obou místnostech pohyboval přibližně stejný počet osob. Počet osob v EK-419 byl získán z Google kalendáře sloužícího na katedře KET jako plánovač akcí. Díky faktu, že rozmístění stolů a tudíž i čidel není identické v obou místnostech, byla data koncentrace CO<sub>2</sub> v porovnávací místnosti brána z čidla označeného indexem 1 (viz Obr. 17). Toto čidlo je umístěno uprostřed zasedacího stolu, tedy ve stejné výšce jako jsou umístěna čidla v místnosti s rekuperační jednotkou. Důvodem, pro zvolení čidla umístěného ve stejné výšce, je že CO<sub>2</sub> je těžší než vzduch a jeho koncentrace je tedy závislá na výšce čidla nad zemí.

Větrání v EK-419 může být zajištěno pouze netěsností oken nebo jejich otevřením. Vzhledem k tomu, že se k porovnání vybrali převážně dny z měsíce ledna, nedá se předpokládat přílišná intenzita větrání okny z důvodu udržení teplotního komfortu.



Graf 7: Porovnání koncentrace CO<sub>2</sub> v EK-319 a EK-419 ve vybraný den

Graf 7 ukazuje hodnoty z 9.1.2019, kdy jednotka běžela v DCV režimu na „prodýchávání“. V obou místnostech bylo přibližně od 10 hodin přítomno 6 osob a to po dobu 1 hodiny a 10 minut v EK-419 resp. 2 hodin a 35 minut v EK-319. Přítomnost osob je patrná z nárůstu CO<sub>2</sub> v místnosti. V místnosti bez rekuperační jednotky dosáhla koncentrace během první hodiny dvojnásobné hodnoty oproti místnosti větrané nuceně. Jednotka zvládla udržet koncentraci okolo 600 ppm a to po celou dobu přítomnosti osob. Druhý peak na křivce EK-419 je způsobený opětovnou přítomností osob, tentokrát pouze dvou lidí. Pro nově příchozí osoby musí takové prostředí působit vydýchaně.

Pouze během ledna 2019, se v místnosti EK-419 nezdávka objevují hodnoty blízké se 5000 ppm. Pobyt v takovém prostředí už je brán jako zdraví nebezpečný. To dokazuje jednoznačný přínos v použití nucené ventilace.

### 5.3.2 Vlastní měření v EK-319

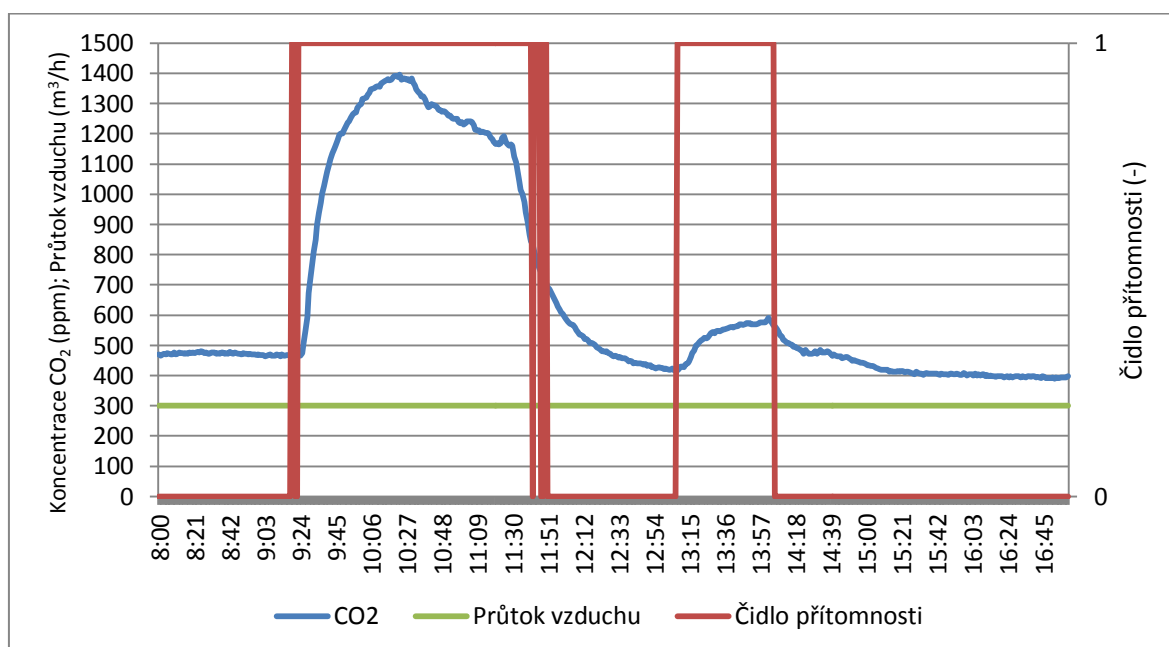
Z dlouhodobého měření od června 2018 do února 2019 vyplývá, že pokud byla jednotka v chodu (nehledě na režim) koncentrace CO<sub>2</sub> v EK-319 nikdy nepřesáhla hodnotu 1500 ppm, kterou česká legislativa udává jako maximální přípustnou.

Koncentrací blízké se 1400 ppm bylo dosaženo pouze přítomností více než 20 lidí a to ve dnech 20.9.2018 a 19.12.2019.

Situaci v zářijový den, kdy v místnosti probíhalo zasedání, zobrazuje Graf 8.

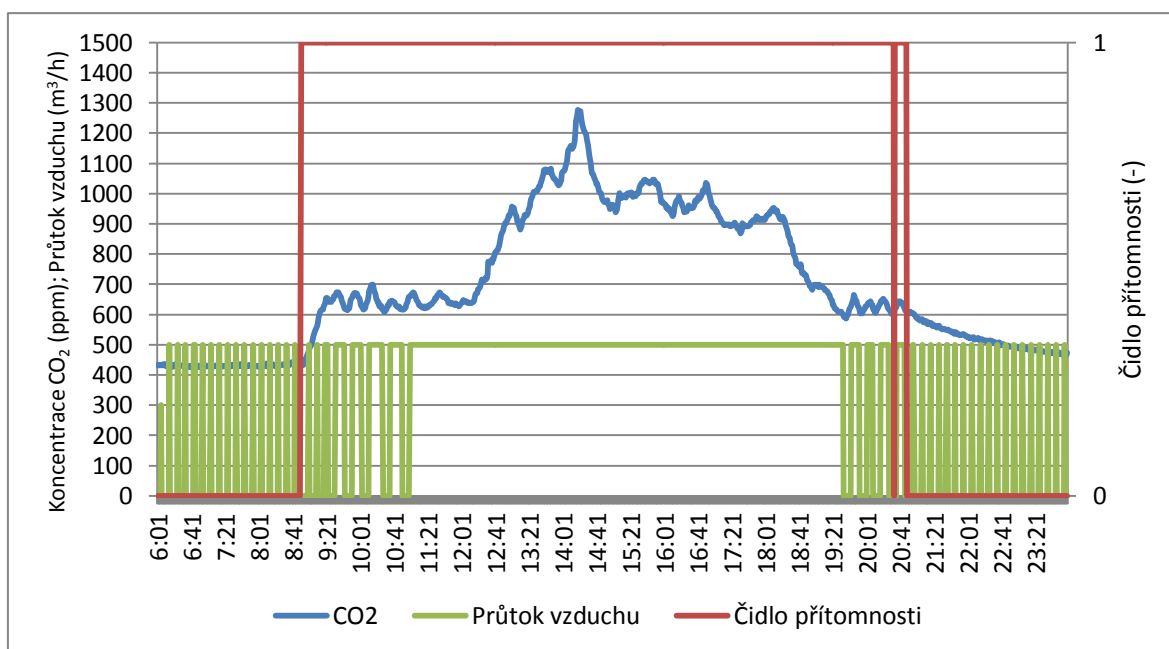
Zasedání se konalo od přibližně 9:20 do 11:45, což je patrné jednak z četnosti spínání čidla přítomnosti v závislosti na tom jak lidé vstupovali do místnosti, tak také z nárůstu CO<sub>2</sub>. Zvyšování koncentrace trvalo až do 10:23 a zastavilo se na 1395 ppm. V tu dobu byla místnost obsazena 23 lidmi. Od té chvíle koncentrace klesá až k hodnotě kolem 420 ppm okolo 13. hodiny. Rychlost poklesu je ovlivněna otevřením dveří na chodbu. Tím jak lidé z místnosti odcházejí, a v domnění že se ihned vrátí a nezavírají dveře, se do místnosti dostává čerstvý vzduch z chodby.

Okolo 13. hodiny vešly do místnosti 4 osoby a byly zde po dobu jedné hodiny. Oproti předešlé akci je patrný pozvolnější nárůst koncentrace CO<sub>2</sub>. Méně lidí vzduch v místnosti znečistí pomaleji. Jednotka v tomto období běžela na režim CAV a minimální průtok vzduchu 300 m<sup>3</sup>/h.



Graf 8: Koncentrace CO<sub>2</sub> 20.9.2018 - max 24 osob, CAV režim

Na Graf 9 je zobrazen průběh koncentrace CO<sub>2</sub> z 19.12.2018. Přibližně od 9 do 12 hodin se v místnosti střídavě pohybovali 4 osoby. Podobně jako v předchozím případě, je měření ovlivněno otevřenými dveřmi, tentokrát po téměř celou dobu akce. Po 12. hodině se počet osob zvedl a koncentrace CO<sub>2</sub> kulminovala ve 14:19 na hodnotě 1277 ppm. V tu dobu bylo v místnosti přítomno 20 osob. Jednotka běžela na režim DCV a „prodýchávání“, spínající podle stavu kvality vzduchu. To je patrné i z četnosti a doby sepnutí. Jednotka nezareagovala na zvýšenou koncentraci nárůstem průtoku vzduchu, ale zvýšením doby sepnutí při 500 m<sup>3</sup>/h. Pro zlepšení kvality vzduchu v místnosti by bylo výhodnější kromě doby sepnutí, zvýšit také průtočné množství vzduchu.



Graf 9: Koncentrace CO<sub>2</sub> 19.12.2018 - max 22 osob, DCV režim

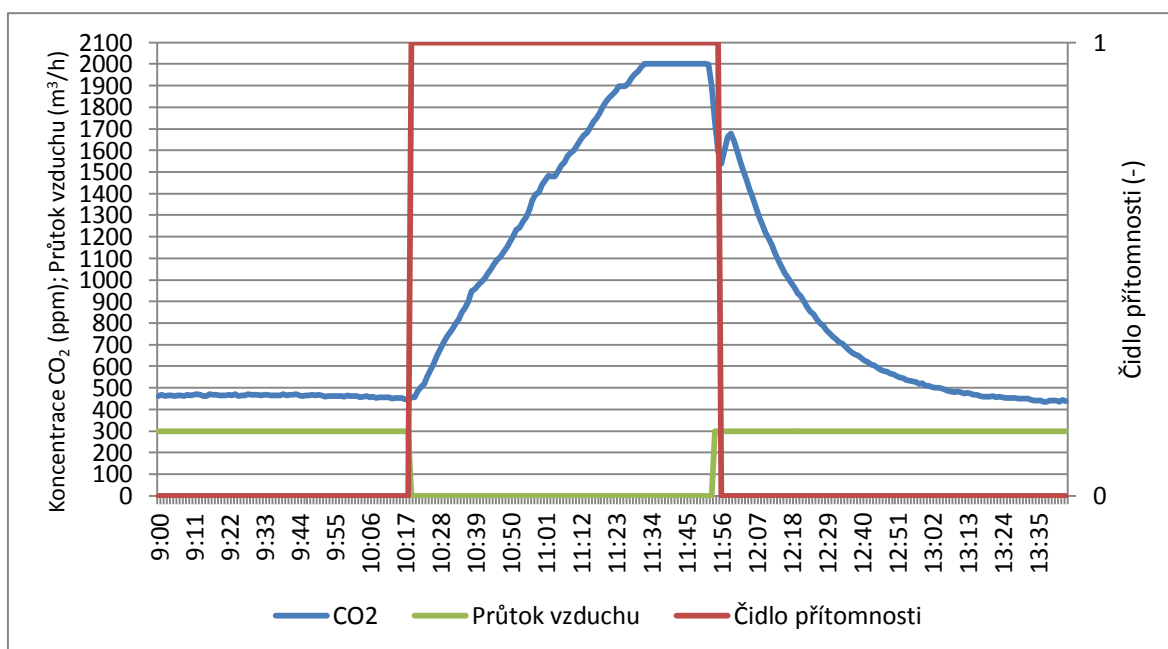
Z hlediska komfortu pro obyvatele místnosti, i úspory energie, by bylo výhodné řídit činnost jednotky externím CO<sub>2</sub> čidlem, což jednotka umožňuje. Odpadlo by tím spínání v 10 minutových intervalech a jednotka by se sepla opravdu pouze v případě nutnosti.

Nicméně v obou těchto dnech jednotka neběžela na plný výkon, takže po navýšení výkonu větrání, by mohla být koncentrace ještě nižší.

Nejvyšší koncentrace a zároveň maximální, kterou čidla dokáží zaznamenat (což je 2000 ppm), bylo dosaženo ve dnech 17.10.2018 a 19.10.2018 a to pouze z důvodu neaktivity jednotky. K jejímu zapnutí došlo až manuálně na konci akce. Jako příklad uvedu Graf 10 na kterém je zobrazen nárůst koncentrace CO<sub>2</sub> dne 17.10.2018.

V této době probíhala v místnosti výuka, které se zúčastnilo 9 žáků + učitel, celkem tedy 10 lidí. Na začátku výuky učitel vypnul jednotku a již po přibližně hodině a čtvrt došlo k nárůstu z hodnoty okolo 450 ppm na hodnotu 2000 ppm. Znečištění vzduchu pravděpodobně dále rostlo, čidla nicméně tuto hodnotu už nebyla schopná zaznamenat. Po skončení výuky byla jednotka opět sepnuta a místnost byla takto vyvětrána na venkovní úroveň CO<sub>2</sub>. Z dostupných dat nelze odůvodnit malý nárůst koncentrace po opuštění místnostmi lidmi.

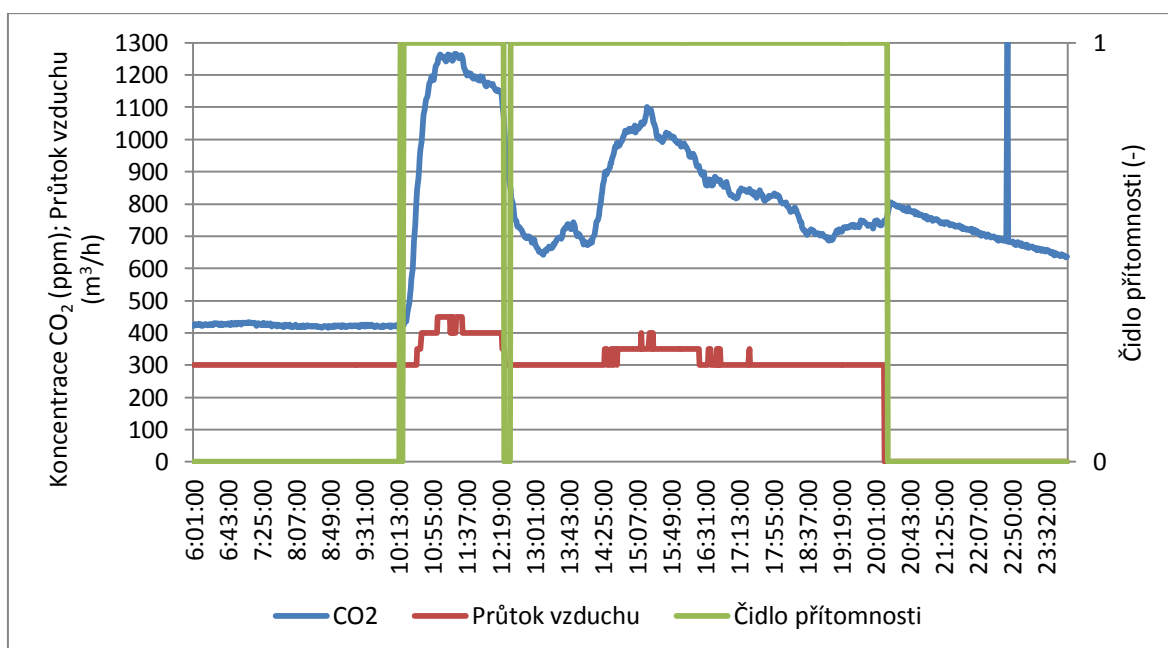




Graf 10: Nárůst koncentrace CO<sub>2</sub> bez činnosti jednotky

Teoreticky maximálně možný počet osob, vycházející z požadavku 25 m<sup>3</sup>/h vzduchu na osobu, činí 28 osob pro nominální výkon 700 m<sup>3</sup>/h. Pokud by jednotka běžela v režimu Boost, kdy dokáže vyměnit 900 m<sup>3</sup>/h vzduchu pak by maximální množství osob bylo 36.

Jako další příklad zde uvedu průběhy ze dne 9.2.2018. Jednotka také běžela na DCV režim, podobně jako je zobrazeno na Graf 9, s tím rozdílem že běžela na konstantní průtok a pouze v případě zvýšení koncentrace CO<sub>2</sub> průtok vzduchu navýšila.

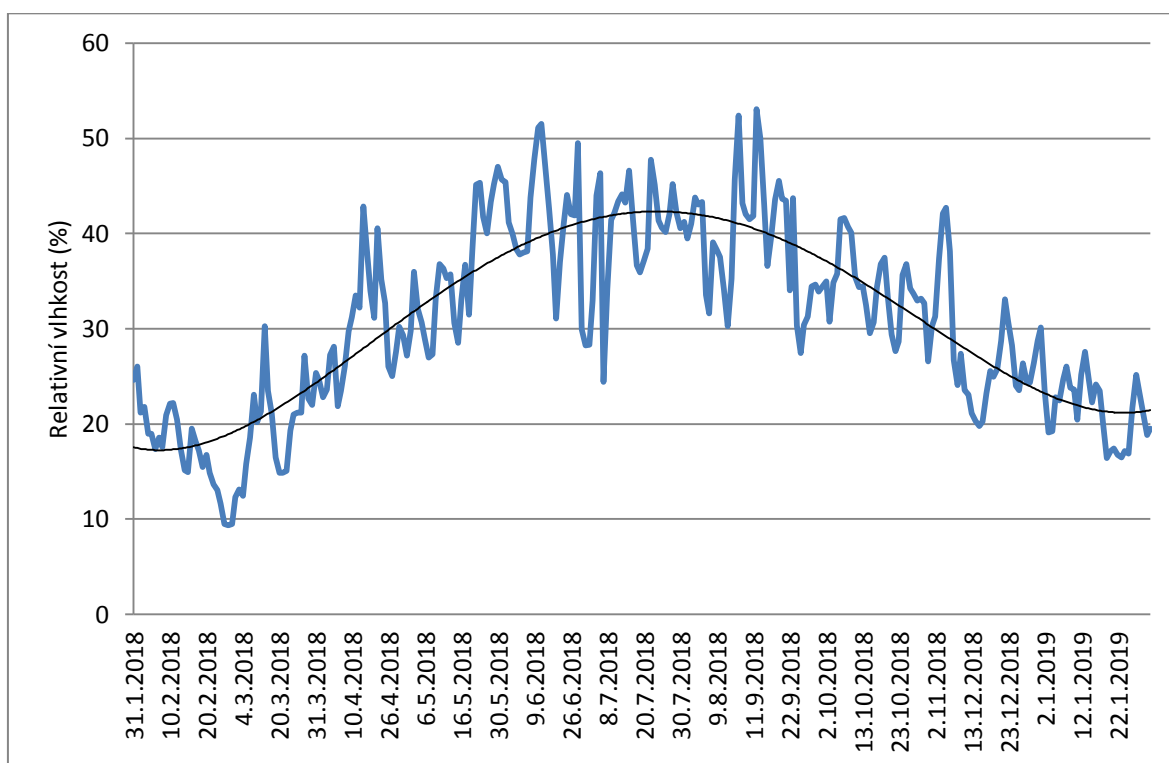


Graf 11: Reakce jednotky na zvýšení koncentrace CO<sub>2</sub> v režimu DCV

Lze vidět, že při překročení přibližně 1000 ppm se průtok zvýšil na 400 m<sup>3</sup>/h a pár minut poté po překročení přibližně 1200 ppm se průtok ještě zvedl o 50 m<sup>3</sup>/h. To stačilo na udržení koncentrace pod 1300 ppm. Po tom co lidé opustili místnost a snížila se koncentrace CO<sub>2</sub> jednotka opět snížila průtok na minimální možný.

#### 5.4 Relativní vlhkost

Výměník použitý v jednotce je pouze teplotní, bez možnosti předání vlhkosti z odpadního vzduchu do vzduchu čerstvého. To má dopad na vysoušení vzduchu v místnosti zejména v zimních měsících. To je patrné i z Graf 12. Relativní vlhkost se v zimních měsících pohybovala výrazně pod 30 %, z počátku roku 2018 dosahovala průměrná denní hodnota dokonce pod 20 %.



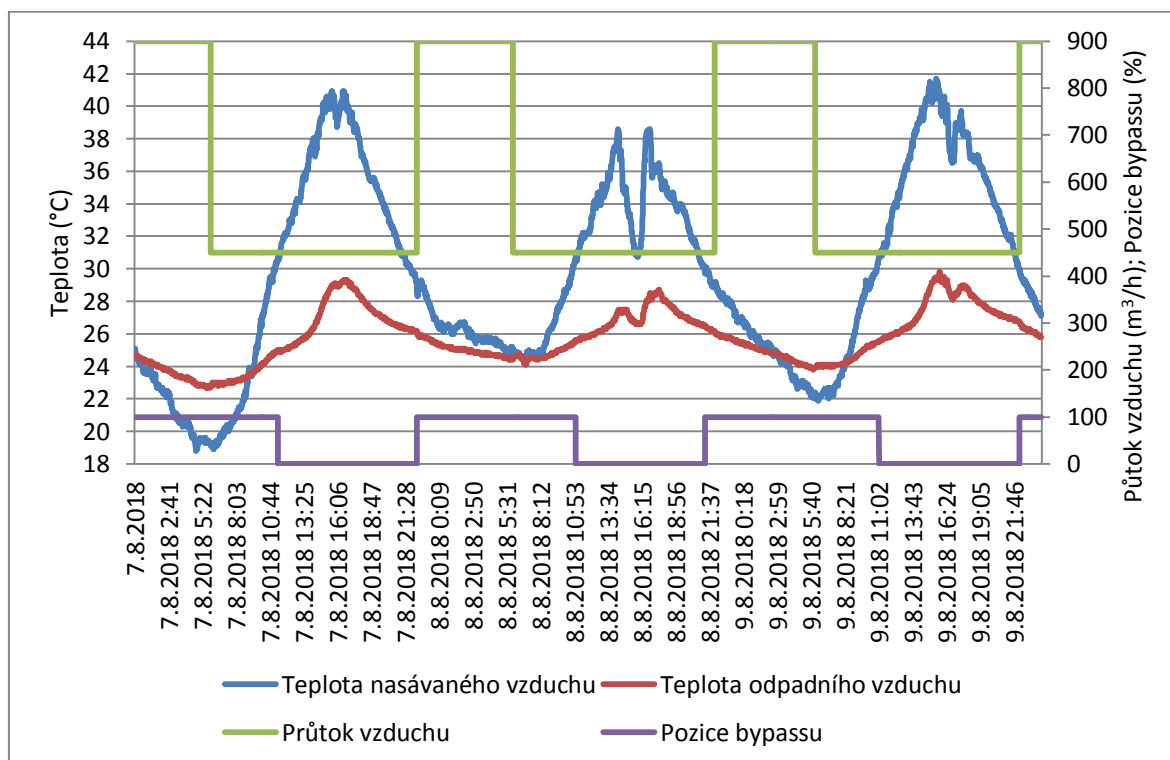
Graf 12: Trend poklesu relativní vlhkosti v zimním období

Zhruba v období listopad až duben by bylo pravděpodobně vhodnější omezit činnost jednotky, a větrat pouze v závislosti na koncentraci CO<sub>2</sub>, tedy v režimu DCV. Tím by se dala udržet vyšší míra vlhkost v místnosti.

Porovnáme-li hodnoty v obou místnostech během ledna 2019, relativní vlhkost v místnosti s jednotkou se pohybuje přibližně o 10 % pod hodnotami dosaženými v EK-419.

## 5.5 Režim Freecooling - využití bypassu v létě

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.2, v letních měsících lze s výhodou využít CAV režimu k předchlazení místnosti během noci a díky tomu udržet nižší teploty v místnosti během dne. Za tímto účelem lze v jednotce zapnout funkci Freecooling, která zvýší průtok vzduchu až na 900 m<sup>3</sup>/h a otevřít bypass výměníku. Bypass se otevírá pro přívodní stranu výměníku, takže čerstvý a chladnější vzduch není ohříván odpadním vzduchem z místnosti. To vede ke snížení teploty vzduchu v místnosti.

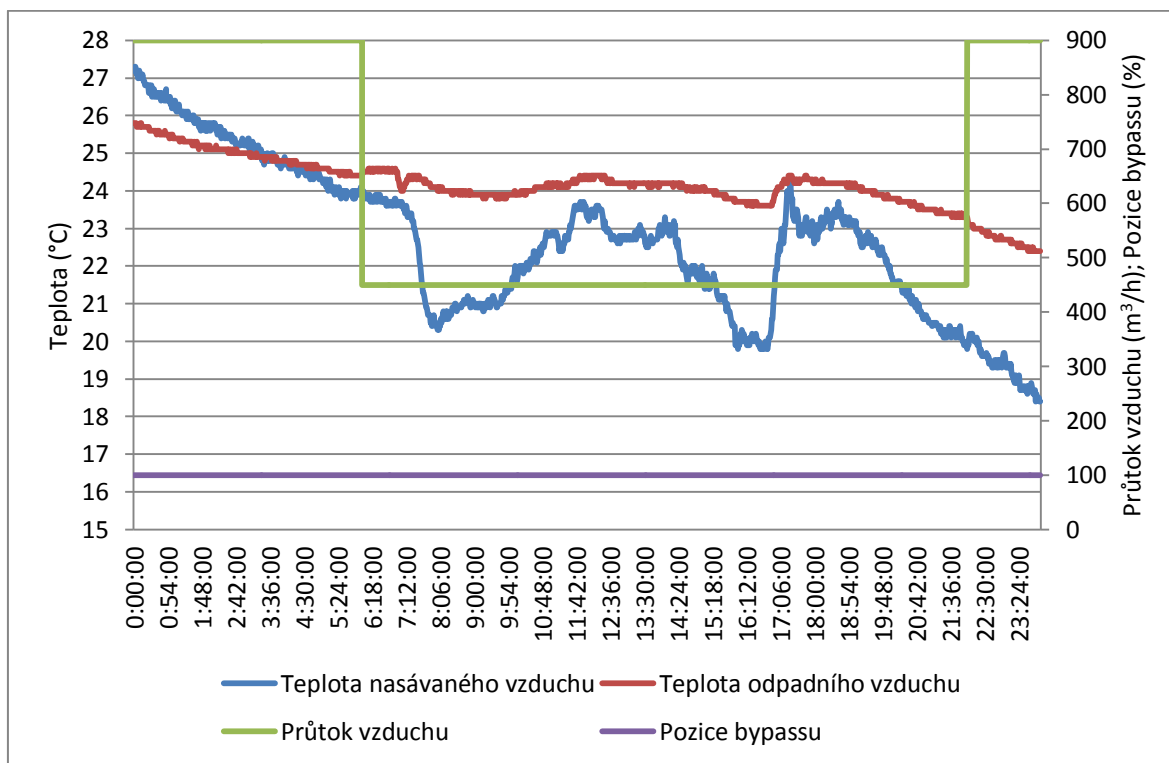


Graf 13: Využití bypassu v srpnu 2018

Graf 13 zobrazuje využití bypassu a režimu Freecooling v srpnu 2018. Režim Freecooling byl pevně nastaven na spínání od 22:00 do 6:00. Jak je z grafu patrné, otevírání bypassu je podmíněno teplotou nasávaného vzduchu. Jakmile venkovní teplota dosáhla přibližně 30 °C bypass se zavřel. Lze také nastavit minimální venkovní teplotu pro otevření bypassu v rozsahu 0 – 20 °C.

Ideální doba pro sepnutí tohoto režimu se z průměru dat získaných za období 16.7.2018 až 13.8.2018 jeví čas mezi 21:30 a 10:00. V tu dobu byla teplota nasávaného vzduchu nižší, než průměrná teplota v místnosti. Z tohoto pohledu by mohla být doba využití režimu Freecooling prodloužena oproti létu 2018 a celkový dopad na teplotu v místnosti mohl být ještě přínosnější. Závisí ovšem na konkrétních podmínkách v daném roce.

Pokud je teplota vzduchu v místnosti nižší, než teplota nasávaného vzduchu, zůstává bypass otevřený i přes den. To dokládá graf z 10.8.2018 (Graf 14). Jednotka tak dokázala vzduch v místnosti ochlazovat i během dne.



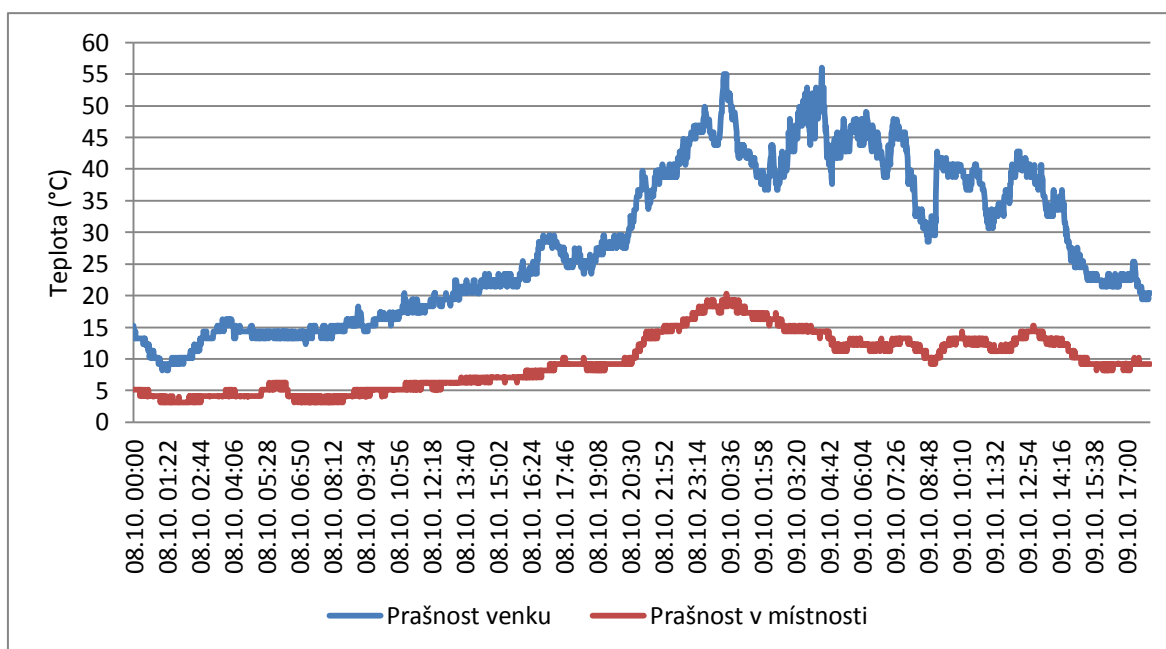
Graf 14: Otevřená pozice bypass i během dne (10.8.2018)

Z dostupných dat lze říci, že režim Freecooling byl aktivní denně od 21.6.2018 do 14.8.2018. Po zbytek srpna data kvůli výpadku nejsou k dispozici. Spínání tohoto režimu je nastaveno na období od 1. května do 1. září.

## 5.6 Prašnost

Vzduch vháněný rekuperační jednotkou do místnosti je čištěn vstupním filtrem a do místnosti se tak dostává vzduch již zbavený prachových částic. Udržení nízké koncentrace prachových částic v místnosti má pozitivní vliv na zdraví lidí.

Čidla prašnosti byla umístěna do potrubí jednotky externě. Ověření funkčnosti filtrace vzduchu je dobře patrné z Graf 15. Je zde zachycen průběh koncentrace prachových částic ve venkovním vzduchu a ve vzduchu vháněném do místnosti během dne. Přestože nasávaný vzduch dosahoval více než dvounásobku koncentrace prachových částic uvnitř místnosti, prašnost uvnitř se držela do 20 mg/m<sup>3</sup>. Jednotka samotná je vybavena rozdílovým měřením tlaku před a za filtrem a díky tomu, je řídicí systém schopný včas upozornit obsluhu k výměně filtru.



Graf 15: Filtrovací schopnost jednotky

## 5.7 Proudění vzduchu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, rychlost proudění vzduchu v místnosti ovlivňuje tepelný komfort. V rámci toho jsem provedl měření anemometrem se žhaveným drátkem Lutron AM-4214SD. Udávaná přesnost přístroje je v rozsahu  $0,2 - 5 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s} + 1 \% FS$  s citlivostí  $0,01 \text{ m/s}$ . Měření mělo ověřit, že rychlost proudění v místech pobytu osob nepřesahuje legislativou stanovený limit  $0,2 \text{ m/s}$ . Pro tak nízkou hodnotu nicméně výrobce neudává přesnost měření. Ani ostatní výrobci nenabízejí anemometry s nižším rozsahem. [27]

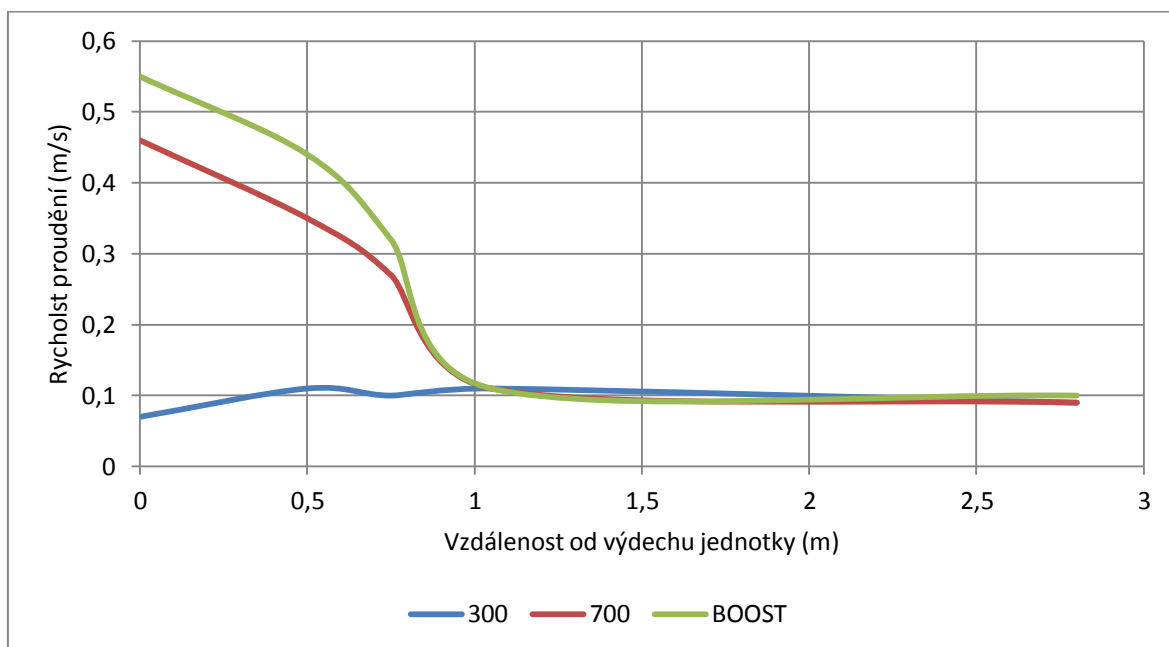
Měření bylo provedeno ve výšce  $1,1 \text{ m}$  nad podlahou na celkem čtyřech místech a sice u stolu č.1 a 2, mezi stoly č.3 a 4 (přímo pod jednotkou) a také před tabulí ve výšce  $1,8 \text{ m}$ . Rozmístění stolů je patrné z Obr. 11. Zvolená výška reprezentuje polohu hlavy sedícího člověka. Rychlost byla změřena pro minimální výkon jednotky  $300 \text{ m}^3/\text{h}$ , nominální  $700 \text{ m}^3/\text{h}$  a maximální v režimu Boost, tedy  $900 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Měření v místech pohybu osob				
	Umístění čidla $1,1 \text{ m}$ nad zemí			
Výkon jednotky	Stůl 1	Stůl 2	Pod jednotkou	Před tabulí
300	0,08	0,09	0,09	0,09
700	0,08	0,09	0,09	0,09
BOOST	0,09	0,09	0,09	0,09

Tabulka 8: Rychlost proudění vzduchu ve výšce  $1,1 \text{ m}$

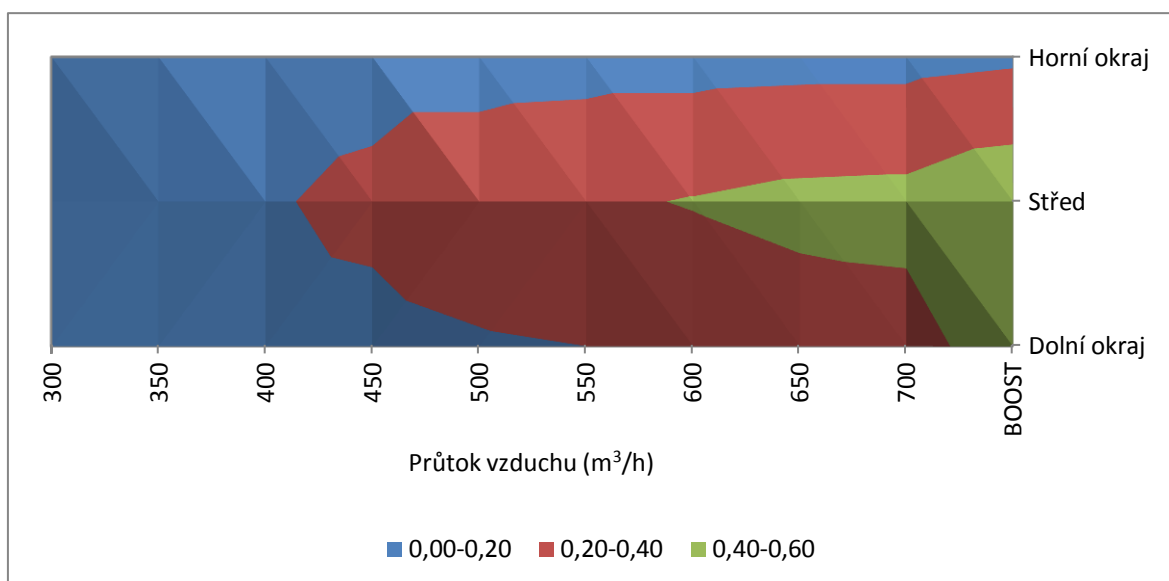
Získané hodnoty se pohybovali v rozmezí 0,8 - 0,9 m/s. A to i při maximálním chodu jednotky. Rychlost proudění se ve zvolených bodech neměnila. Při režimu Boost byla změřena i rychlost proudění v 0,1 m nad podlahou. Tato výška odpovídá úrovni kotníků kde je člověk, zejména v letním období kdy je často nošena otevřená obuv, citlivý na průvan. Ani tato hodnota neprokázala porušení limity 0,2 m/s.

Změřena byla i rychlost proudění v úrovni výdechu jednotky pro vzdálenost 0,5 m, 0,75 m, 1 m, 2,8 m a přímo u výdechu. Pokles rychlosti proudu vzduchu je vidět na Graf 16. Jak již bylo zmíněno v úvodu této podkapitoly, výrobci pro tak malou rychlost proudění ani neudávají přesnost měření. Tento fakt může být jedním z důvodů, proč dle grafu dochází k nárůstu rychlosti při výkonu 300 m<sup>3</sup>/h. Rychlost proudění je příliš malá na přesné změření a může zde vznikat chyba.



Graf 16: Pokles rychlosti proudění se vzdáleností

U výdechu jednotky se dá nastavit náklon tak, aby proudící vzduch nezačal „padat“ příliš brzy a nedošlo k nepříjemnému pocitu průvanu pro osoby v určité vzdálenosti od jednotky. Současné nastavení výdechu je 10° náklon směrem ke stropu, tak aby vzdušný proud překonal šířku místnosti. To má vliv na vertikální rozložení proudu přímo u výdechu tak jak je znázorněno na Graf 17. Vyšší rychlost je u spodního okraje, rozdíl je patrný zhruba od průtoku 500 m<sup>3</sup>/h. Krajní polohy byly měřeny 1 cm od okraje směrem ke středu.



Graf 17: Vertikální rozložení rychlosti proudění vzduchu u výdechu

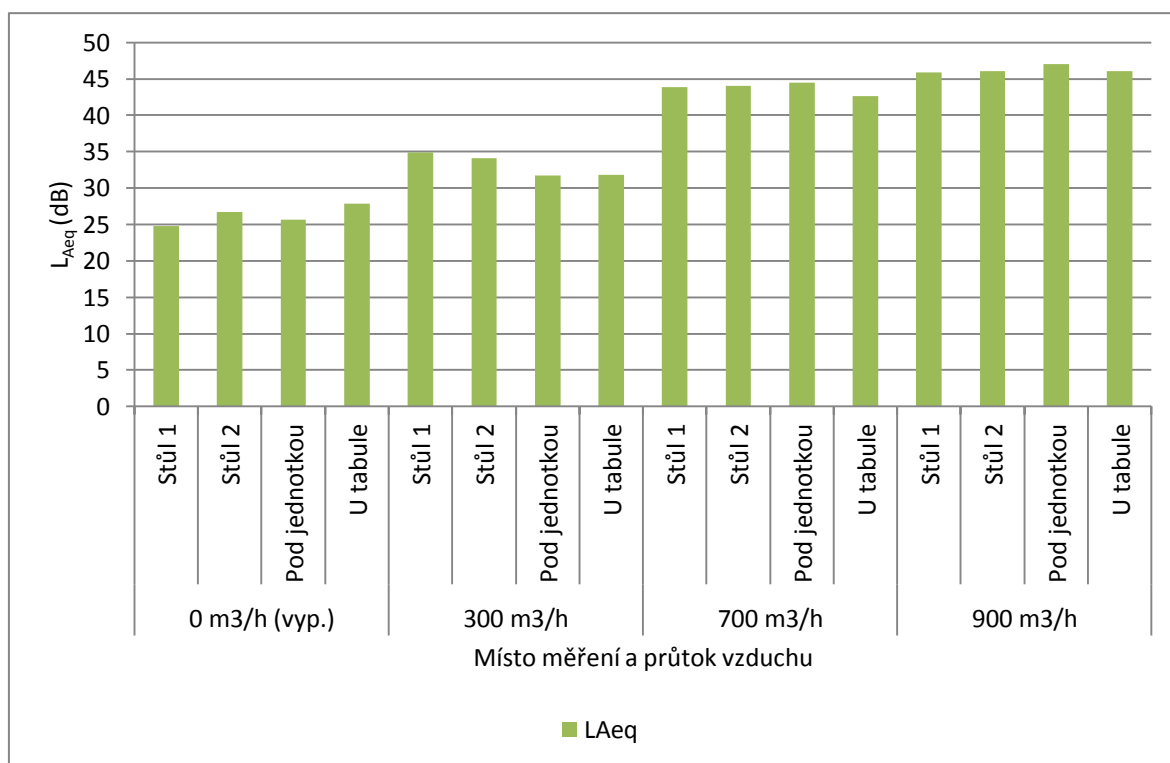
## 5.8 Hlučnost

Také v rámci ověření hygienických požadavků na hlučnost daných vládním nařízením č.272/2011 Sb. popsanych v kapitole 2.4, jsem provedl měření ekvivalentní hladiny akustického tlaku  $L_{Aeq}$  a spolu se spektrální analýzou hluku v místnosti kvůli ověření přítomnosti tónových složek.

Měření bylo provedeno za pomoci digitálního zvukoměru NTi Audio XL2 s mikrofonom NTi Audio M2210. Zvukoměr je přesnosti třídy 1. Citlivost mikrofону je 21,4 mV/Pa.

V místnosti byly zvoleny celkem čtyři měřící body zhruba ve výšce hlavy sedícího člověka. První bod je u stolu č.1, druhý u stolu č.2, třetí přímo v místě sezení pod jednotkou a čtvrtý bod byl měřen u tabule. V těchto čtyřech bodech byl změřen hluk pozadí při vypnuté jednotce a poté hluk při minimálním, nominálním a maximálním výkonu jednotky.

Zvukoměr byl nastaven na váhovací filtr A a měřící interval 30 sekund. Frekvenční spektrum bylo proměřeno v třetinooktávových pásmech. Měření probíhalo v odpoledních hodinách běžného pracovního dne, proto byl volen relativně krátký časový interval. Jednak hluk produkovaný jednotkou je ustálený, takže není nutné měřit dlouhý časový interval. A za druhé, díky kratšímu intervalu byla také menší šance na ovlivnění měření zvuky jdoucími z chodby.



Graf 18: Hlučnost pozadí a hlučnost jednotky při různých průtocích vzduchu

Na Graf 18 jsou zobrazeny výsledky měření pro zmíněné čtyři měřicí body. Zcela vlevo je hluk pozadí, který se pohybuje v rozmezí 24,8 až 27,9 dB. Hodnoty získané při průtoku 300 m<sup>3</sup>/h jsou v rozmezí 31,7 až 34,9 dB. Nejmenší rozdíl mezi hodnotou hluku pozadí a hlukem při provozu na minimální průtok vzduchu činí 3,9 dB což jsou z pohledu člověka špatně rozeznatelné hodnoty.

Hodnota 3 dB se uvádí jako mezní pro rozpoznání rozdílu hlasitosti zvuku, dobré rozlišení je pak při rozdílu 5 dB. Musíme brát také v úvahu přesnost měření a vlastní šum mikrofону. Subjektivně lze však říci, že chod jednotky na minimální průtok vzduchu není nikterak obtěžující, a např. při běžném hovoru v místnosti mizí v pozadí.

Hodnoty hlučnosti při nominálním průtoku už jsou od hluku jednotky na minimální provoz vzdáleny o přibližně 10 dB. Což lze přirovnat k dvojnásobné hlučnosti. Stále jsou však hodnoty pod legislativou stanovených 45 dB (viz Tabulka 7 na straně 36). Subjektivně už je hluk jednotky rušivý a případná dlouhodobá expozice nemusí být každému příjemná.

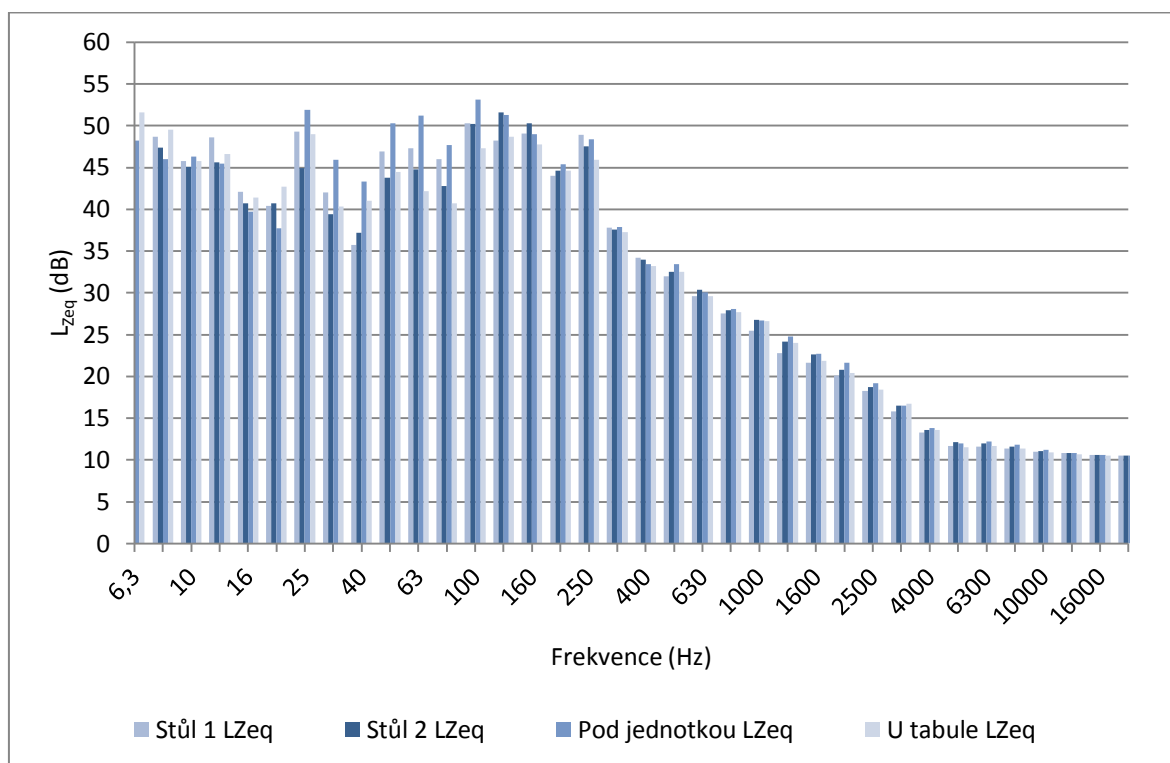
Hlučnost při maximálním průtoku jednotky už přesahují limitu 45 dB, avšak velmi těsně a to o 2 dB v nejhorsím případě.

Lze říci že při správném použití jednotky, kdy nebude nutné hnát množství vyměněného vzduchu k maximálním možným hodnotám, nepůsobí jednotka rušivým dojmem.



Toto je však subjektivní pocit. Objektivně lze říci, že limity stanovené vládním nařízením jednotka s výjimkou chodu na maximální výkon splňuje. Režim BOOST však není určený pro kontinuální provoz během výuky a limity v tomto režimu jsou překročeny velmi těsně.

Měření také prokázalo že hluk způsobený jednotkou neobsahuje tónovou složku, a není tedy nutná korekce limitní hodnoty hluku  $-5$  dB, která se provádí právě pro hluk s tónovou složkou.



Obr. 18. Rozložení hladiny akustického tlaku podle frekvence při nominálním výkonu jednotky

## 5.9 Výpadky měření

Měření pokrývá období od 31.1.2018 do 25.3.2019, což je 418 dnů neboli 1,15 roku. Během této doby došlo k čtým výpadkům.

Výpadky se projevují buď kompletním výpadkem měření, případně zaseknutím data a času v datalogu. Nejdelší výpadek trval od 6.11.2018 do 1.12.2018, což je 25 dnů. Listopad byl, co se týče měření, nejvíce zatížený výpadek. Měření probíhalo pouze po dobu 6 dnů. Další dlouhý výpadek proběhl od 14.8.2018 do 7.9.2018, tedy 24 dnů. Krátké výpadky v řádu dní postihli v podstatě všechny měsíce roku 2018. Nejvíce dní bez výpadku v tomto roce bylo v únoru, červenci a říjnu. První kvartál roku 2019 je bez delších výpadků.

## 6 Ekonomická a energetická bilance

Hlavním úkolem rekuperační jednotky je možnost řízené ventilace a tím udržení zdravotně nezávadného prostředí v místnosti. Díky ZZT ale dokáže jednotka také ušetřit náklady za vytápění tím, že se při větrání většinu tepla předá čerstvému vzduchu. V rámci této práce nebylo možné vyčíslit náklady ušetřené za vytápění, ať už z důvodu toho že není měřena energie spotřebovaná na vytápění nebo nejsou známy tepelné ztráty místnosti. Tím pádem nelze určit ani návratnost zařízení.

Protože neméně důležitým faktorem je hospodárnost jednotky, pokusím se zde alespoň vyčíslit náklady na provoz jednotky získané za dobu měření, a vliv zvoleného režimu na spotřebu.

Cena základní verze jednotky WHISPER AIR 700 m<sup>3</sup>/h, tj. bez ohřevu vzduchu a ve standartním plášti, činí 148 002 Kč. Nejdražší variantou je verze s elektrickým předehřevem, vodním dohřevem a designovým krytem. Ta vyjde na 176 263 Kč. Pořizovací cena modelu instalovaného na katedře je 173 965 Kč. Ceny jsou uváděny bez DPH a jsou platné k 10.5.2019. Připočteme-li hrubě odhadnuté náklady za instalaci jednotky na 10 000 Kč, pak celkové investiční náklady činí bezmála 184 000 Kč.

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, měření probíhá od 31.1.2018 a mnou zpracovaná data končí 25.3.2019. Vezmu-li období přesně jednoho roku, tedy od 31.1.2018 do 31.1.2019 pak celková spotřeba elektrické energie činí 1 176,14 kWh. Z toho 30 % náleží činnosti ventilátorů, pouze 4 % energie bylo spotřebováno na vyhřívání spirály předehřevu. Zbýlých téměř 66 % náleží spotřebě za dohřev vzduchu.

Největší vliv na spotřebu měla činnost dohřevu vzduchu a to hlavně v případech, kdy jednotka běžela v chladných dnech na konstantní průtok. Jen za únor a březen 2018, kdy venkovní teploty dosahovali nízkých hodnot, dosáhla spotřeba dohřevu vzduchu 56 % celkové roční spotřeby dohřevu (774 kWh).

Uvážíme-li, že průměrná cena za 1 kWh elektrické energie v ČR činila v roce 2018 4,07 Kč, pak celkové náklady na provoz jednotky za výše uvedené období jednoho roku dosáhly 4 787 Kč. Při vhodně zvoleném režimu, tzn. režim CAV v letních měsících a DCV s prodýcháváním v chladnější části roku budou náklady ještě nižší. [28]

Hrubý odhad ročních nákladů, vypočtený na základě průměrné denní spotřeby v letních a zimních měsících je uveden v Tabulka 9. Odhad roční spotřeby je proveden tak,

že 8/12 roku je brána spotřeba jako průměrná hodnota za letní měsíce v režimu CAV. Po zbytek roku je brána spotřeba jako průměr v zimních měsících v režimu DCV a prodýchávání. Většina spotřeby jednotky v létě je způsobena chodem ventilátorů, která je během zvolených měsíců ještě navýšena režimem Freecooling. Tento nárůst bude však zanedbatelný.

Provozní režim	CAV a minimální průtok			DCV s prodýcháváním		
Měsíc	červen	červenec	srpen	leden	únor	březen
Průměrná denní spotřeba v měsíci (kWh)	2,63	2,59	3,04	0,30	0,12	0,17
Odhad spotřeby za celý měsíc (kWh)	78,90	80,29	94,24	9,30	3,24	5,27
Odhad průměrné spotřeby za období léto/zima (kWh)	84,48			5,94		
Odhad roční spotřeby (kWh)	699,56					
Odhad ročních nákladů při ceně 4,07 Kč/kWh (Kč)	2847					

*Tabulka 9: Odhad ročních nákladů při vhodněji zvoleném režimu*

Při vhodněji zvoleném režimu lze provozní náklady o zhruba 2 000 Kč snížit oproti skutečné spotřebě získané z doby měření.

## 7 Závěr

Účelem práce je zhodnotit současnou potřebu nucené ventilace zejména ve školních a kancelářských prostorách, což je realizováno na konkrétním případě rekuperační jednotky WHISPER AIR umístěné na Katedře elektroenergetiky a ekologie. Důvodem pro to, je stále větší důraz kladený na nízkou energetickou náročnost budov, což jde proti požadavkům na kvalitu vnitřního prostředí v budovách.

Jako nutný základ pro pochopení nutnosti větrání a udržení dobré kvality prostředí, jsem v prvních dvou kapitolách uvedl obecný popis možných způsobů ventilace a rekuperace tepla, spolu s hygienickými požadavky na kvalitu mikroklimatu a udržení tepelné pohody. Mimo to jsem zde také uvedl požadavky na hluk a vibrace, které také ovlivňují duševní a fyzický stav člověka. Jsou zde uvedeny i legislativou dané limity.

Ve třetí a čtvrté kapitole je umístěno seznámení s parametry a funkcí jednotky a měřicího systému pro sběr dat v místnosti. Jsou zde také stručně popsány principy činnosti použitých čidel a jejich rozmístění.

Hlavní část, tedy pátá kapitola, je věnována vyhodnocení dat z dlouhodobého měření. Vyhodnocovány jsou klíčové mikroklimatické podmínky, které jednotka svou činností ovlivňuje. Jsou to teplota, vlhkost, rychlost proudění, koncentrace CO<sub>2</sub> a hluk. Bylo také ověřeno plnění hygienických limitů daných legislativou. Důležitým aspektem v hodnocení činnosti jednotky je také spotřeba elektrické energie, což je v kapitole také popsáno.

Poslední šestá kapitola je věnována ekonomické a energetické bilanci jednotky za dobu měření. Je zde uvedena celková roční spotřeba a vyčíslena cena za energii získaná z průměrné ceny 1 kWh v České republice pro rok 2018. Vzhledem k tomu, že jednotka běžela svůj první provozní rok, je zde také uveden odhad poklesu spotřeby, pokud by byl během roku vhodněji zvolený režim větrání.

Co se týče samotného zhodnocení vlivu jednotky na kvalitu prostředí, zejména porovnání s měřeními provedenými v podobné místnosti bez nucené ventilace, prokázala práce nepopíratelný a pozitivní dopad na hladinu CO<sub>2</sub>, což je klíčový parametr odrážející kvalitu vzduchu.

Nicméně při nevhodně zvoleném režimu, dochází v místnosti k nadměrnému vysoušení vzduchu a také vysoké spotřebě elektrické energie, zejména z důvodu dohřevu vzduchu. Toto lze eliminovat tím, že po chladnější polovinu roku, tedy zhruba od listopadu

do dubna, je vhodnější jednotku provozovat v režimu DCV, tedy v nárazovém větrání v závislosti na hladině koncentrace CO<sub>2</sub>. Ještě vhodnějším řešením, pro aplikaci ve školách a kancelářích obývaných po větší část dne, by bylo využití regenerativních výměníků. Jejich nevýhoda, kdy nelze zcela odstranit promísení vstupního a výstupního proudu vzduchu, v takových aplikacích, pokud v daném místě není velké znečištění z dopravy apod., až tak nevádí. Naopak přínosem by byla možnost neustálého chodu jednotky při udržení dobré teploty a zejména vlhkosti v místnosti.

Z hlediska kontroly CO<sub>2</sub> by bylo také výhodné využít možnosti připojení externího čidla CO<sub>2</sub>. Tím by odpadla nutnost „prodýchávání“, nutná ke zjištění stavu odpadního vzduchu. Snížila by se tím i spotřeba elektrické energie.

V letních měsících lze s výhodou využít režim nočního větrání Freecooling, který pomáhá udržet příjemnou teplotu i během dne bez nutnosti klimatizace. Uvedl jsem zde také časové rozmezí vhodné pro spínání tohoto režimu, stanovené na základě hodnot z přelomu července a srpna 2018.

Z hlediska hlučnosti jednotka vyhovuje, při normálním provozu, platným limitům hlučnosti v učebnách, které jsou stanoveny na 45 dB. Také hodnoty rychlosti proudění vzduchu vyhovují ve všech režimech maximální přípustné hodnotě 0,2 m/s.

V současné době je vydána pouze metodika větrání školních prostor, nikoliv nařízení. To lze ale do budoucna očekávat, pak tato práce alespoň z kraje potvrzuje smysluplnost nucené ventilace a její pozitivní dopad na zdravé životní prostředí uvnitř budovy a při správném použití i hospodárnost takového řešení.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Zmrhal, Vladimír. *Větrání rodinných a bytových domů*. Praha : Grada Publishing, a.s., 2014.
- [2] Zikán, Zdeněk. Zpětné získávání tepla a větrání objektů. *TZB-info*. [Online] 22. 3 2010. <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/6325-zpetne-ziskavani-tepla-a-vetrani-objektu>.
- [3] Székyová, Marta, Ferstl, Karol a Nový, Richard. *Větrání a klimatizace*. Bratislava : JAGA, 2006.
- [4] Kalina, Jiří a Dufek, Pavel. Ventilace s rekuperací – některá upozornění a doporučení. *TZB-info*. [Online] 18. 6 2009. <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/5724-ventilace-s-rekuperaci-nektera-upozorneni-a-doporuceni>.
- [5] Jindrák, Martin. Co je podtlakové větrání, jak funguje a kdy se používá. *estav.cz*. [Online] <https://www.estav.cz/cz/2487.co-je-podtlakove-vetrani-jak-funguje-a-kdy-se-pouziva>.
- [6] Jindrák, Martin. Přetlakové větrání – funkce, výhody a nevýhody. *estav.cz*. [Online] <https://www.estav.cz/cz/2570.pretlakove-vetrani-funkce-vyhody-a-nevyhody>.
- [7] Jindrák, Martin. Rovnotlaké větrání s rekuperací tepla - co to je a jak funguje? *estav.cz*. [Online] <https://www.estav.cz/cz/3087.rovnotlake-vetrani-s-rekuperaci-tepla-co-to-je-jak-to-funguje>.
- [8] Zpětné získávání tepla ve vzduchotechnice. *Technika prostředí www.qpro.cz*. [Online] <https://www.qpro.cz/ZZT-rekuperace-regenerace>.
- [9] Chyský, Jaroslav a Hemzal, Karel. *Technický průvodce větrání a klimatizace*. Brno : Bolit-B press, 1993.
- [10] Lain, Miloš. Zpětné získávání tepla ve větrání a klimatizaci (I). *TZB-info*. [Online] 6. 11 2006. <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/3648-zpetne-ziskavani-tepla-ve-vetrani-a-klimatizaci-i>.
- [11] Lain, Miloš. Zpětné získávání tepla ve větrání a klimatizaci (II). *TZB-info*. [Online] 20. 11 2006. <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/3688-zpetne-ziskavani-tepla-ve-vetrani-a-klimatizaci-ii>.
- [12] Mathauserová, Zuzana. Hygienické požadavky na vnitřní prostředí staveb. *TZB-info*. [Online] 25. 2 2013. [https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/9595-hygienicke-pozadavky-na-vnitri-prostredi-staveb#english\\_synopsis](https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/9595-hygienicke-pozadavky-na-vnitri-prostredi-staveb#english_synopsis).

- [13] ČR, Věstník ministerstva zdravotnictví. *Metodický návod na měření a hodnocení mikroklimatických podmínek na pracovišti a vnitřního prostředí staveb*. 2013.
- [14] Centnerová, Lada. Hodnota metabolismu. *tzb-info.cz*. [Online] 2001. <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/569-hodnota-metabolismu#tabulka>.
- [15] Centnerová, Lada. Izolace oblečení. *tzb-info.cz*. [Online] 2001. <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/576-izolace-obleceni>.
- [16] ČSN ISO 7730. *Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu*. místo neznámé : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [17] Vyhláška č. 410/2005 Sb. *Vyhláška o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých*. 2005.
- [18] Vyhláška č. 268/2009 Sb. *Vyhláška o technických požadavcích na stavby*. 2009.
- [19] Šubrt, Roman. Mikroklima ve veřejných budovách jako důvod instalace rekuperace. *EDUin*. [Online] 2015. <https://www.eduin.cz/wp-content/uploads/2015/02/Studie-Koncentrace-CO2-ve-skolach.pdf>.
- [20] Zikán, Zdeněk. Oxid huličitý - utajený nepřítel. *tzb-info.cz*. [Online] 2011. <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/7132-oxid-uhlicity-utajeny-nepritel>.
- [21] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. *Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*. 2011.
- [22] Pešta, Jan a Zwiener, Viktor. Hlukové limity a měření hluku - stav po 1. lednu 2019. *Atelier-DEK*. [Online] 2019. <https://atelier-dek.cz/>.
- [23] Křivka Fletcher-Munson. *admmagazin.cz*. [Online] 2017. <https://admmagazin.cz/krivka-fletcher-munson/>.
- [24] IME Nemo 96 HD. *Rayleigh Instruments*. [Online] <https://www.rayleigh.com/ime-nemo-96hd-single-three-phase-network-multi-function-meter.html>.
- [25] Eatec. *Transmitters*. [Online] <https://www.eatec.it/en/transmitters.html>.
- [26] 2VV. CI-CO2-M. *Produktový katalog*. [Online] <http://www.2vv.cz/katalog-produktu/ci-co2-m>.
- [27] Lutron. Hot Wire Anemometer. *Datasheet*. [Online]

[https://oceancontrols.com.au/files/datasheet/lut/lut016\\_AM-4214SD.pdf](https://oceancontrols.com.au/files/datasheet/lut/lut016_AM-4214SD.pdf).

[28] Cena elektřiny za kWh v roce 2018 poskočila na 4,1 Kč. Proč koukat i na jiné částky? *elektrina.cz*. [Online] <https://www.elektrina.cz/cena-elektriny-za-kwh-2018-cez-eon-pre-a-jini-dodavatele-elektriny>.