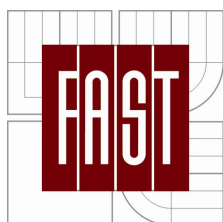


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF BUILDING SERVICES

VYUŽITÍ NÍZKOTEPLTNÍCH ZDROJŮ ENERGIE PRO VZDUCHOTECHNICKÉ SYSTÉMY V OBYTNÝCH BUDOVÁCH

USING LOW TEMPERATURE ENERGY SOURCES
FOR VENTILATION SYSTEMS
IN RESIDENTIAL BUILDINGS

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE
PHD THESIS STATEMENT

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. PAVEL ADAM

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JIŘÍ HIRŠ, CSc.

Obsah

Abstrakt	3
Předmluva	4
1 Úvod	5
2 Přehled současného stavu problematiky	6
2.1 Požadavky na kvalitu vnitřního vzduchu	6
2.2 Základní větrací systémy	6
2.3 Obnovitelné (a) nízkoteplotní zdroje energie	7
2.4 Systémy větrání využívající NZE	8
2.5 Vhodné počítavé programy	8
3 Cíle dizertační práce	9
3.1 Specifikace cílů práce	9
3.2 Zdůvodnění vybraných cílů	10
4 Metody řešení	11
4.1 Teoretické metody	11
4.2 Experimentální metody	11
5 Výsledky dizertační práce	12
5.1 Větrací systém 1	12
5.2 Větrací systém 2	16
5.3 Větrací systém 3	18
5.4 Experimentální měření kompaktního výměníku tepla	20
5.5 Experiment. měření vlásečnicových výměníků tepla	23
5.6 Měření CO ₂ v rodinném domě	25
6 Závěr	26
6.1 Význam pro praxi	27
6.2 Význam pro rozvoj vědního oboru	28
Literatura	29
Životopis	30

Abstrakt

Teoretická část práce se zabývá řešením tří VZT systémů.

U *prvního VZT systému*, a to využití kapalinového ZVT jako zdroj energie pro předehřev/ochlazení čerstvého přiváděného vzduchu, je možno dosáhnout energ. úspor. Ty se v zimním období, při obj. průtoku vzduchu $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, a uvažované teplotě zeminy 4 a 8 °C, pohybují v rozmezí 227 - 359 kWh, při nárůstu potřeby el. energie o 6 kWh. V letním období pak 17 - 38 kWh, při nárůstu potřeby el. energie o 8 kWh. Při uvažované PC 40.000,- jsou zisky poměrně malé a při uvažované životnosti systému 100 let se investice nevrátí.

U *VZT systému 2*, tj. systému kombinující VZT a solární systém, byl výpočet proveden v poč. programu Trnsys pro 2 objekty - nízkoenergetický (NED) a dvoupodlažní (DD) dům - a 6 různých solárních systémů. U NED vychází u jednotlivých variant energ. zisky 49, 59 a 46 kWh za rok (při 2622 kWh/rok/vyt.). U DD jsou energ. zisky 86, 134 a 129 kWh (při 8988 kWh/rok/vyt.). Při uvažované PC 30.000,-, životnosti 30 let, a srovnání s vytápění el. energií, vychází návratnost delší než doba životnosti zařízení.

U *VZT systému 3*, se jedná o systém bytového větrání, s kapalinovým okruhem se dvěma kompaktními výměníky tepla (dále KVT) na přívodu a odvodu vzduchu. Výsledky ukazují, že při objemovém průtoku vzduchu $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ lze, oproti větrání bez zpětného získávání tepla, v zimním období uspořit 1761 - 3148 kWh energie (16-hod a 24-hod provoz), při nárůstu potřeby elektrické energie 173 - 262 kWh. Vzhledem k těmto pozitivním výsledkům byl proveden výpočet ekonomické návratnosti pro 6 variant (různý druh energie na ohřev, cena, typy výměníků, atd.). Doba návratnosti systému se pohybuje v rozmezí 5 - 20 let. Životnost je uvažována 30 let.

V rámci *experiment. výzkumu* byl vybudován měřicí úsek umožňující měření VT. Následně proběhlo experiment. měření KVT z běžných materiálů (ocel, hliník, měď). Ukázalo se, že vybraný výměník je vhodný pro instalaci v navržených systémech. Jeho účinnost se pohybuje v rozmezí 58 % - 82 % (při obj. průtocích vzduchu $570 - 55 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), s tlakovou ztrátou na straně vody 8 - 14 kPa, na straně vzduchu 1 - 10 Pa.

Měřicí úsek byl optimalizován a měřeny různé vlasečnicové výměníky tepla. Jejich účinnost se pohybuje v rozmezí 38 - 63 % (při obj. průtocích vzduchu $300 - 900 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Tlaková ztráta na straně vody je 7,9 - 11,6 kPa, na straně vzduchu 11,4 - 17,7 Pa. Výměníky jsou nadáleny vyvíjeny a optimalizovány.

Výsledky z měření CO₂ v RD ukazují, že hodnoty koncentrace CO₂ se blíží k hodnotě 5000 ppm. Přitom max. povolená hodnota je 1200 ppm.

Předmluva

Předkládaná práce se postupně formovala během celého doktorského studia. Na začátku práce započaly tím, že byla měřena kvalita vzduchu z pohledu CO₂ v obytných budovách, kdy tato měření ukázala, že instalace účinného vzduchotechnického systému je velmi důležitá. Teoretické výpočty se zaměřily na zkoumání možnosti využití teplotního potenciálu zeminy, a to s využitím plošného kapalinového registru, který byl v té době velmi propagován vzduchotechnickými firmami. V laboratoři, na Fakultě stavební, VUT v Brně, Ústavu TZB, byl v rámci projektu FRVŠ 1986/2008/G1 sestaven měřící úsek, umožňující měření výkonu a tlakových ztrát kompaktních výměníků tepla. V terénu probíhala měření solárních kolektorů. Pomocí poč. programu Trnsys byla následně zkoumána možnost využití přebytečných solárních zisků ze solárního systému pro předehřev čerstvého větracího vzduchu. Tento výzkum byl rovněž pracovní náplní spoluřešení dvou projektů GAČR a 5-ti měsíčního pobytu v Dánsku.

Systém předhřevu vzduchu pomocí přebytečných zisků tepla ze solárních kolektorů se ukázal poměrně složitý a málo účinný. Nicméně práce posloužila pro další úvahy a následně, při realizaci a provozu solárního systému v RD, se zrodila myšlenka systému dohřevu čerstvého větracího vzduchu, který by mohl být podstatně jednodušší a zároveň mohl přinášet vyšší energetické zisky. Systém byl modelován v programu Trnsys, kdy první výpočty vypadaly příznivě. Nikde v literatuře nebylo nalezeno podobné zapojení, a tak byl systém patentován formou užitého vzoru. Při následných výpočtech ve spojení s budovou se nicméně ukázalo, že systém funguje dle předpokladu, ale zároveň je odebírána část tepla pro ohřev teplé vody, a tudíž není tak výhodný, jak se předpokládalo.

Na základě jeho užitého vzoru Ing. Ivana Cifrince, Ph.D., MBA), a s podporou projektu č. 912, FAST-S-11-29, byl následně zkoumán systém bytového větrání pomocí dvou kompaktních výměníků tepla (na přívodu a odvodu větracího vzduchu), vzájemně propojených kapalinovým okruhem, umožňujícím ZZT. Teoretické výpočty tohoto systému pomocí numerických vztahů a v programu Trnsys ukázaly velmi pozitivní výsledky a systém bude předmětem dalšího výzkumu.

Poslední rok studia, v rámci projektu č. CZ.1.05/3.1.00/13.0274 VUT Energetické zdroje, byl v laboratoři optimalizován měřící úsek umožňující měření vlásečnicových výměníků tepla a následně provedeno měření 7 prototypů vlásečnicových výměníků tepla. Výsledky z těchto měření ukazují velmi pozitivní hodnoty. Tyto výměníky by mohly být součástí VZT systémů a podstatně tak zlevnit jeho cenu a návratnost. Budou předmětem dalšího výzkumu.

1 Úvod

Výzkumy chování lidí ve vyspělých zemích ukazují, že průměrný člověk tráví 80 až 90 procent času uvnitř budov (Jenkins, 2000, Statistics Canada, 1998). Značnou část této doby tráví lidé ve svých obydlích (přibližně 60 %). Kvalita vnitřního prostředí tedy hraje v moderní společnosti velmi významnou úlohu [3].

Jedním ze složek ovlivňujících kvalitu vnitřního prostředí je kvalita vzduchu. Tu lze hodnotit podle řady faktorů, mezi které patří tepelně-vlhkostní, aerosolové, mikrobiální, oděrové, radonové a toxické mikroklima. V prostorách, kde jsou zdrojem oděrových látek lidé se pro hodnocení kvality prostředí používá nejčastěji koncentrace oxidu uhličitého. Již v 19. století byly Maxem von Pettenkoferem definovány potřebné hodnoty koncentrace oxidu uhličitého, které je třeba zajistit. Jak však ukazují mnohá měření [2], při spoléhání se pouze na přirozené větrání, je tato hodnota často, a ve velké míře, překračována. Účinné větrání je stále ve většině případů opomíjeno. To nese problémy nejen zdravotní, ale neřízeným větráním dochází rovněž k větší spotřebě energie.

Odhaduje se, že v zemích OECD se okolo 28 EJ spotřebuje v obytných budovách, z čehož asi 12 EJ na větrání. Výpočty naznačují, že energetickou náročnost větrání je možno snížit na 1 EJ [5]. Většina budov (země OECD), používá stále přirozené větrání (75 - 80 % jednogeračních domů, 50 % v bytových domech) [9]. Dle výsledků Českého statistického úřadu bylo ke dni sčítání lidu v roce 2011 přibližně 1,8 milionu obydlených bytů v rodinných domech a 2,26 milionu obydlených bytů v bytových domech. Dle odhadu má pouze malé procento z nich instalovaný účinný větrací systém.

U provedených instalací se jedná převážně o systémy mechanického větrání se zpětným získáváním tepla pomocí deskového nebo rotačního výměníku tepla, které dosahují účinnosti 70 % - 90 %. U těchto systémů se v poslední době rozšířilo používání systému předehřevu/předchlazení čerstvého venkovního vzduchu instalací vzduchového, nebo kapalinového, zemního výměníku tepla. Ty se však staly distabilním tématem, a to zejména k jejich účinnosti (návratnosti) a u vzduchového výměníku tepla rovněž k jeho možným negativním zdravotním vlivům. Stále malá pozornost je věnována jiným obnovitelných zdrojům energie, a to především systémům, využívající sluneční energie pro předehřev nebo dohřev čerstvého větracího vzduchu.

Výzkum účinného větrání, využívajícího obnovitelných/nízkoteplotních zdrojů energie, je předmětem zájmu společnosti v mnoha ohledech, a to z pohledu zdraví, pracovní produktivity, úspor energie, atd.

2 Přehled současného stavu problematiky

Přehled současné problematiky se zabývá větráním budov, možností využití obnovitelných zdrojů energie pro VZT systémy a počítačovými programy určenými k modelování dynamického chování technických systémů budov.

2.1 Požadavky na kvalitu vnitřního vzduchu

Zajištění optimální kvality vnitřního vzduchu lze zajistit přívodem čerstvého vzduchu. Potřebný objemový průtok vzduchu lze stanovit z Pettenkoferova kritéria nebo z intenzity výměny vzduchu.

Pettenkoferovo kritérium hodnotí kvalitu vzduchu podle koncentrace oxidu uhličitého ve vzduchu, kdy průměrná hodnota za 24 hodin by neměla překročit 1000 ppm (tj. 0,1 % = $1,0 \text{ l.m}^{-3} = 1800 \text{ mg.m}^{-3}$), čemuž odpovídá množství čerstvého vzduchu na osobu 23 až 28 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$. Nejvýše přípustná hodnota CO_2 , která by nikdy neměla být překročena (v průběhu celých 24 h), je koncentrace 1200 ppm (tj. 0,12 % = $1,2 \text{ l.m}^{-3} = 2160 \text{ mg.m}^{-3}$) [6]. Pettenkoferovo kritérium je stále základní veličinou standardů většiny vyspělých států.

Dle vyhlášky č. 268/2009 Sb. o techn. požadavcích na stavby, §11, odst. 5 musí mít obytné místnosti zajištěno dostatečné větrání a musí být dostatečně vytápěny s možností regulace vnitřní teploty. Pro větrání obytných místností musí být zajištěno v době pobytu osob minimální množství vyměňovaného venkovního vzduchu 25 m^3/h na osobu, nebo minimální intenzita větrání 0,5 h^{-1} . Jako ukazatel kvality vnitřního prostředí slouží oxid uhličitý CO_2 , jehož koncentrace ve vnitřním vzduchu nesmí překročit hodnotu 1 200 ppm.

2.2 Základní větrací systémy

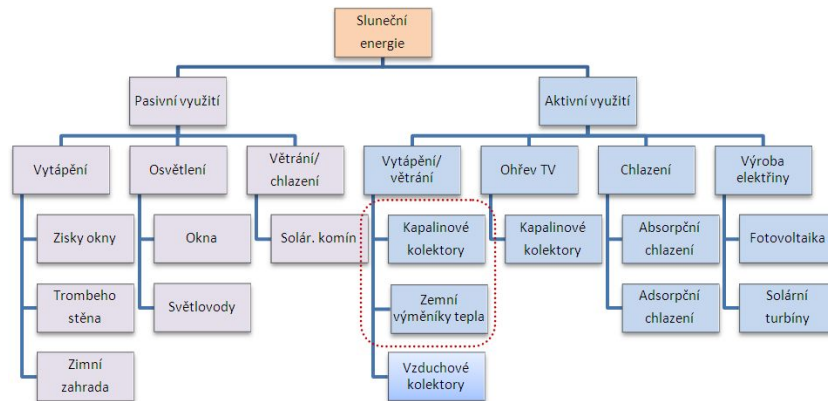
Základní větracími systémy jsou: A) *Přirozené větrání*, kdy k výměně vzduchu v budově (místnosti) dochází vlivem tlakového rozdílu, který je vyvolán účinkem přírodních sil; B) *Kombinované (podtlakové) větrání*, kdy se jedná nejčastěji o kombinaci nuceného odtahu s přirozeným přívodem vzduchu okny a dveřmi; C) *Nucené větrání* s centrální přívodem a odvodem vzduchu; D) *Hybridní větrání*, který kombinuje účinek přirozených (vztlakových) sil se silou mechanickou a je řízen nejčastěji na základě koncentrace CO_2 .

2.3 Obnovitelné (a) nízkoteplotní zdroje energie

Obnovitelné zdroje energie (dále OZE) lze členit z různých hledisek, nicméně téměř pro všechny energeticky podmíněné děje v našem životním prostředí je společné, že hnací silou je sluneční záření. Jde například o:

- Pohyb vzduchu na základě rozdílných teplot a tlaků (větrná energie).
- Oteplování povrchu Země a atmosféry (využití tepla např. tep. čerpadly).
- Pohyby moří (vlny a mořské proudy).
- Růst vegetace (fotosyntéza, biomasa).

Pokud se zaměříme "pouze" na přeměnu sluneční energie na teplo nebo elektřinu, lze uvažovat následující způsoby využití - viz obr. 2.4 [8].



Obr. 1: Způsoby využití sluneční energie [8].

a

^aPozn. Červeně ohraničené způsoby využití OZE, jsou ty, které budou součástí VZT systémů řešených v této dizertační práci.

Je-li řeč o aktivních systémech nebo o aktivním využívání soustav energie, mohou tím být míněny jak soustava se slunečními kolektory, tak také soustava fotovoltaická, protože v obou případech jde o získávání sluneční energie technickými systémy. Naproti tomu u pasivního využití sluneční energie se dá využít sám dům jako druh kolektoru a získanou sluneční energii lze využít bez pomocných technických prostředků pro podporu vytápění domu[8].

Kromě OZE může být využito *nízkoteplotních zdrojů energie*, kterými je např. teplo obsažené v odpadním vzduchu.

2.4 Systémy větrání využívající NZE

Ve VZT systémech se nejčastěji využívá nízkoteplotního zdroje energie (dále NZE) pomocí deskového VT a rekuperačního VT.

Z obnovitelných zdrojů se využívá teplotní potenciál zeminy (příp. studniční vody). Odběr energie ze země (vody) se nejčastěji realizuje jako zemní výměník tepla. Ten může být ve dvou provedeních - vzduchový (plastovou trubkou, prům. cca 15 - 20 cm [10], uloženou v zemi, proudí čerstvý větrací vzduchu) nebo kapalinový (registrem trubek uložených v zemi protéká nemrznoucí kapalina; odebírá energii a tu následně pomocí kompaktního výměníku tepla (dále KVT) předává čerstvému větracímu vzduchu).

Dalším způsobem využití OZE je solární systém se zásobníky teplé vody. Ten je potrubím propojen s KVT, umístěným na přívodu na přívodu čerstvého větracího vzduchu.

2.5 Vhodné počítavé programy

Na trhu je řada počítačových programů, určených pro dynamickou analýzu energetických systémů staveb. Mezi nejznámější patří - Trnsys, ESP-R, Design Builder, IDA-ICE a TAS. První dva (Trnsys, ESP-r), tj. programy s dlouhou historií vývoje, jsou níže rozepsány podrobněji.

TRNSYS (a TRaNsient SYstem Simulation program; výslovováno: TRAN-sys) je modulární simulační program (vyvinutý vědci z Wisconsinské univerzity), který slouží především pro dynamickou analýzu energ. systémů staveb. Celý problém zjednodušuje rozdělením řešené úlohy na jednotlivé komponenty. Knihovna TRNSYSu obsahuje mnoho předdefinovaných komponent, běžně používaných v energ. systémech, modelech budov. Trnsys počítá s hodinovými meteorologickými daty ve formátu TMY (a Typical Yeteorological Year).

ESP-r je volně šiřitelný program, vyvinutý v roce 1974 výzkumnou skupinou pro energetické systémy na Strathclydské univerzitě ve Skotsku. Program pracuje primárně pod operačním systémem Unix; v operačním systému Windows lze spustit přes Unix modulátor. Výpočet je založen na metodě konečných prvků. Program umožňuje výpočet energetické náročnosti budovy a jejich technických systémů. Lze jej stáhnout z ESRU's internetových stránek.

3 Cíle dizertační práce

Cílem práce je analýza souč. stavu problematiky, teoretický výzkum tří VZT systémů, návrh, realizace a optimalizace měřícího úseku, umožňujícího měření výměníků tepla (společná část všech tří VZT systémů), experimentální měření různých typů výměníků tepla a ověření kvality vzduchu z pohledu CO₂ v rodinném domě.

3.1 Specifikace cílů práce

Zvládnutí, a objasnění, dané problematiky, předpokládá dosažení následujících cílů:

1. Analýza požadavků na kvalitu vzduchu, systémů větrání a možností využití obnovitelných zdrojů tepla pro větrání a přitápění.
2. Analýza počítačových programů, určených k dynamickému modelování energetických systémů budov, s následným výběrem.

3. Výzkum větracích systémů 1¹, 2², 3³, sestávající z následujících kroků:
 - Teoretický návrh uspořádání.
 - Popis matematického modelu.
 - Sestavení počítač. modelu ve vybraném počítač. programu.
 - Nadefinování okrajových podmínek.
 - Numerické výpočty za různých okrajových podmínek.
 - Optimalizace, včetně variantních řešení.
 - Ekonomika provozu a návratnost investice.
 - Definování dílčích závěrů pro další výzkum a pro praxi.

4. Experiment. změření účinnosti kompaktního výměníku tepla, jako součást "systémů 1, 2, 3", sestávající z následujícího:
 - Návrh vhodného uspořádání měřící trati.
 - Analýza a následný výběr vhodných měř. postupů, čidel a přístrojů.
 - Vlastní realizace měřící trati.
 - Výběr vhodného výměníku tepla.
 - Experiment. změření výměníku tepla za různých provoz. podmínek.

¹Systém využívající teplotního potenciálu země příp. studniční vody pro předehřev příp. ochlazení čerstvého větracího vzduchu.

²Systém využívající tepla ze solárního systému pro dohřev vzduchu.

³Systém umožňující zpětné získávání tepla z odpadního vzduchu.

- Vyhodnocení výsledků měření.
 - Výběr vhodných numerických vztahů a následný přepočet účinnosti výměníku tepla na jiné provozní podmínky.
-

5. Experiment. měření účinností vlásečnicových výměníků tepla, jako součást "systémů 1, 3", sestávající z následujícího:

- Optimalizace měřicí trati.
 - Optimalizace měřících postupů, čidel a přístrojů.
 - Experimentální změření různých typů vlásečnicových výměníků tepla za různých provozních podmínek.
 - Vyhodnocení výsledků měření.
 - Výběr vhodných numerických vztahů a následný přepočet účinnosti výměníku tepla na provozní podmínky srovnatelné s konkurencí.
-

6. Experimentální změření kvality vzduchu v rodinném domě.

7. Celkové shrnutí výsledků a definování závěru pro další výzkum a praxi.

3.2 Zdůvodnění vybraných cílů

Cíle práce byly voleny v souladu se zadáním dizertační práce. Jejich cílem je objasnit danou problematiku a přispět k pokroku v oblasti větrání a využití obnovitelných zdrojů energie.

4 Metody řešení

K dosažení vytyčených cílů práce bude použito teoretických a experimentálních metod řešení.

4.1 Teoretické metody

1. Analýza řešené problematiky, zahrnující zejména následující oblasti:
 - kvalita vzduchu a větrání bytových objektů,
 - využití obnovitelných zdrojů energie pro větrání,
 - počítačové programy vhodné k modelování dynamického chování technických zařízení budov.
2. Návrh uspořádání tří vzduchotechnických systémů (VZT systémů).
3. Definici okrajových podmínek VZT systémů.
4. Matematický popis VZT systémů.
5. Sestavení počítačového modelu VZT systémů.
6. Numerické výpočty provozu VZT systémů.
7. Optimalizaci VZT systémů.
8. Výpočet ekonomiky provozu a návratnosti investice VZT systémů.
9. Definování dílčích závěrů a doporučení pro další výzkum a praxi.

4.2 Experimentální metody

Experimentální metody zahrnují:

1. Návrh měřicí trati za účelem měření účinnosti nízkoteplotního výměníku tepla (NVT).
2. Vlastní realizaci a zprovoznění měřicí trati v laboratoři.
3. Optimalizaci měřicí trati.
4. Výběr vhodných měřících postupů k měření jednotlivých veličin.
5. Experimentální změření NVT (výkon, tlak, ztráty,...) za různých provozních podmínek.
6. Experimentální změření několika typů vlásečnicových výměníků tepla (výkon, tlak, ztráty, ...) za různých provozních podmínek.

5 Výsledky dizertační práce

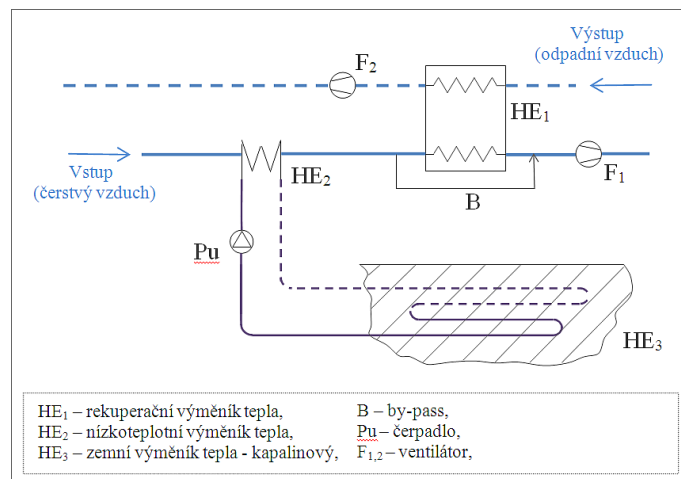
V této kapitole jsou popsány teoreticky a experimentálně získané výsledky, a to v souladu s vytyčenými cíly - tj. výzkum tří vzduchotechnických systémů, realizace a optimalizace měřicího úseku, umožňujícího měření výměníků tepla (jako součást všech tří systémů), výsledky z exp. měření výměníků a měření kvality vzduchu v rodinném domě.

5.1 Větrací systém 1

”Větrací systém 1” řeší využití teplotního potenciálu zeminy/studničního vody, pomocí kapalinového okruhu s nízkoteplotním výměníkem tepla, pro předehřev nebo ochlazení čerstvého venkovního vzduchu.

5.1.1 Popis technického řešení

U tohoto systému je v přívodním vzduchotechnickém potrubí umístěn, před VZT jednotkou, ”nízkoteplotní výměník tepla” (dále NVT), který je napojen na kapalinový zemní výměník tepla. Schematicky je systém znázorněn na obrázku 2.



Obr. 2: Větrací systém 1 - schéma

5.1.2 Popis matematického modelu

Základními vzahy použitými ve výpočtu jsou vztahy pro výpočet výměníku tepla s konstantní účinností, vztah pro výpočet potřeby tepla/chladu a vztah pro výpočet potřeby elektrické energie.

Výměník tepla s konstantní účinností

Výměník tepla s nulovou kapacitou citelného tepla je modelován jako zařízení s konstantní účinností, které je nezávislé na systémovém uspořádání. Výpočet maximálního možného tepelného výkonu je založen na minimální kapacitě proudící tekutiny a teplotě tekutiny na vstupu do VT (studená a teplá strana).

Názvosloví - veličiny

C_c	$[\text{W} \cdot \text{K}^{-1}]$	celk. tepelná kapacita chladnější tekutiny, $C_c = \dot{m}_c \cdot c_{p,c}$;
C_h	$[\text{W} \cdot \text{K}^{-1}]$	celk. tepelná kapacita teplejší tekutiny, $C_h = \dot{m}_h \cdot c_{p,h}$;
C_{max}	$[\text{W} \cdot \text{K}^{-1}]$	maximální tepelná kapacita tekutiny;
C_{min}	$[\text{W} \cdot \text{K}^{-1}]$	minimální tepelná kapacita tekutiny;
$c_{p,c}$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita chladnější tekutiny (za konst. tlaku);
$c_{p,h}$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita teplejší tekutiny (za konst. tlaku);
ε	$[-]$	účinnost výměníku tepla;
\dot{m}_c	$[\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}]$	hmotnostní průtok chladnější tekutiny;
\dot{m}_h	$[\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}]$	hmotnostní průtok teplejší tekutiny;
\dot{Q}_T	$[\text{W}]$	celkový výkon VT;
$\dot{Q}_{T,max}$	$[\text{W}]$	maximální výkon VT;
T_{ci}	$[\text{°C}]$	teplota chladnější tekutiny na vstupu;
T_{ho}	$[\text{°C}]$	teplota teplejší tekutiny na výstupu;
U_A	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	celkový součinitel prostupu tepla VT.

Matematický popis

Výpočet výměníku tepla je založen na přístupu efektivity minimální celkové kapacity, kdy se zadává účinnost výměníku tepla a jeho vstupní podmínky. Model následně rozhodne, zda chladnější (zátěž) nebo teplejší (zdroj) strana je stranou s minimální celkovou kapacitou a vypočítá tepelný tok, založený na rovnici 7. Parametry na výstupu z VT jsou pak počítány pomocí rovnic 8 a 9.

Celková tepelná kapacita na obou stranách VT je počítána podle následujících čtyř rovnic.

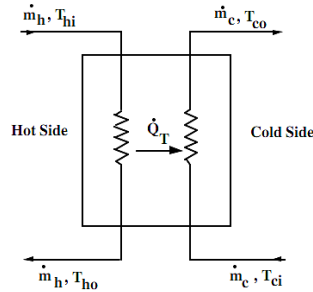
$$C_c = \dot{m}_c \cdot C_{p,c} \quad (1)$$

$$C_h = \dot{m}_h \cdot C_{p,h} \quad (2)$$

$$C_{max} = \text{maximální hodnota z } C_h \text{ a } C_c \quad (3)$$

$$C_{min} = \text{minimální hodnota z } C_h \text{ a } C_c \quad (4)$$

Schématicky je VT znázorněn na *obrázku 3*.



Obr. 3: Schématické znázornění výměníku tepla [11].

Ke stanovení maximálního možného tepelného toku v daný časový okamžik jsou použity následující vztahy:

$$\text{Jestliže } C_{min} = C_{h,pak} \quad \dot{Q}_{max} = C_h \cdot (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (5)$$

$$\text{Jestliže } C_{min} = C_{c,pak} \quad \dot{Q}_{max} = C_c \cdot (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (6)$$

Vlastní přenos tepla pak závisí na uživatelem specifikované účinnosti.

$$\dot{Q}_T = \varepsilon \cdot \dot{Q}_{max} \quad (7)$$

Konečně, podmínky na výstupu z VT jsou počítány pro dva proudy tekutiny.

$$T_{h,o} = T_{h,i} - \left(\frac{\dot{Q}_T}{C_h} \right) \quad (8)$$

$$T_{c,o} = T_{c,i} + \left(\frac{\dot{Q}_T}{C_c} \right) \quad (9)$$

Potřeba tepla na vytápění a potřeba el. energie

Potřeba tepla na vyt. a potřeba el. energie se spočtou následovně:

$$\dot{Q} = \rho \cdot c_p \cdot \dot{V} \cdot (t_i - t_e) \quad (10)$$

Kde je: Q - potřeba tepla na vytápění; ρ - hustota tekutiny; c_p - měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku; \dot{V} -objemový průtok vzduchu; $t_i(t_e)$ - teplota vnitřního (venkovního) vzduchu; H - počet hodin provozu.

$$E = P \cdot H \quad (11)$$

Kde je: E - potřeba el. energie; P - příkon ventilátorů; H - počet hodin provozu ventilátorů.

5.1.3 Vlastní model systému

Oběhové čerpadlo v okruhu kapalinového zemního výměníku tepla se v zimním období spustí, když teplota přiváděného vzduchu poklesne pod $-0,5 \text{ }^\circ\text{C}$; v letním období, když teplota přiváděného vzduchu překročí $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Cílem výpočtu je zjistit množství energie potřebné na dohřev/dochlazení "čerstvého větracího vzduchu" (dále ČVV) na pokojovou teplotu, tj. $20 \text{ }^\circ\text{C}$ v zimě a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ v létě.

Je uvažován 24 hodinový provoz VZT, s obj. průtokem vzduchu $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Účinnost zpětného získávání tepla pomocí "deskového výměníku tepla" (dále DVT) uvažována 85 %; účinnost NVT uvažována 75 %. Teplota zeminy/studniční vody uvažována konstantní, tj. 4 a $8 \text{ }^\circ\text{C}$ v zimě a 12 a $16 \text{ }^\circ\text{C}$ v létě. V případě, že teplota ČVV v zimě klesne pod $-2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ a hrozilo by zamrznutí výměníku, je uvažováno se snížením účinnosti výměníku (v praxi to znamená snížit přívod vzduchu, vlivem podtlaku se pak část čerstvého vzduchu dostává do domu infiltrací). Toto snížení účinnosti je uvažováno ve dvou verzích - skokově a plynule. Délka zimního období uvažována 1. září - 31. května; délka letního období uvažována 1. června - 31. srpna.

5.1.4 Výsledky

Výsledky výpočtu, včetně výpočtu ekon. návratnosti, jsou uvedeny v kap.6.

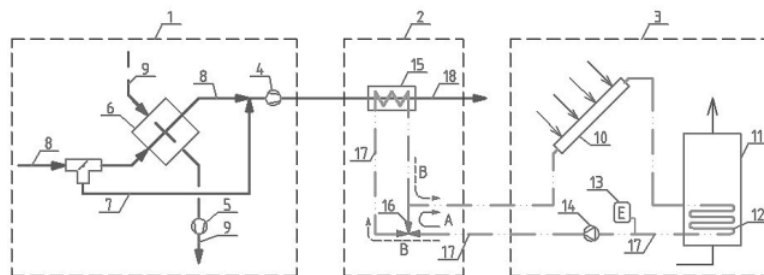
Ekonomická efektivnost investic, byla spočtena pomocí "Výpočtové pomůcky ekonomické efektivnosti investí", dostupné na stránkách www.tzb-info.cz.

5.2 Větrací systém 2

”Větrací systém 2” kombinuje VZT a solární systém a využívá nevyužitých solárních zisků v solárním systému. Systém je chráněn formou užitého vzoru (viz literatura [1]).

5.2.1 Popis technického řešení

Systém sestává ze VZT jednotky a solární jednotky, které jsou vzájemně propojeny jednotkou nízkoteplotního výměníku tepla s trojcestnou regulační armaturou - viz obr. 4. Trojcestná regulační armatura umožňuje průtok solární kapaliny pouze solární jednotkou v okruhu (A) nebo solární jednotkou, rozšířenou o nízkoteplotní výměník tepla v okruhu (B), přičemž nízkoteplotní výměník tepla je ve směru proudu solární kapaliny připojen mezi trojcestnou regulační armaturou a teplovodní solární kolektory solární jednotky.



Obr. 4: VZT systém využívající přebytek tepla ze solárního systému [1].

a

^a1 – vzduchotechnická jednotka 2 – jednotka nízkoteplotního výměníku tepla s regulační armaturou 3 – solární jednotka 4 – přívodní ventilátor 5 – odvodní ventilátor 6 – prvek zajišťující zpětné získávání tepla 7 – by-pass 8 – přívodní vzduchotechnické potrubí čerstvého venkovního vzduchu 9 – odvodní vzduchotechnické potrubí vnitřního znehodnoceného vzduchu 10 – teplovodní solární kolektory 11 – akumuláční nádoba 12 – solární výměník tepla 13 – expanzní nádoba 14 – oběhové čerpadlo 15 – nízkoteplotní výměník tepla 16 – trojcestná regulační armatura 17 – vratná část solárního systému 18 – vzduchotechnické potrubí rozvádějící ohřátý venkovní vzduch

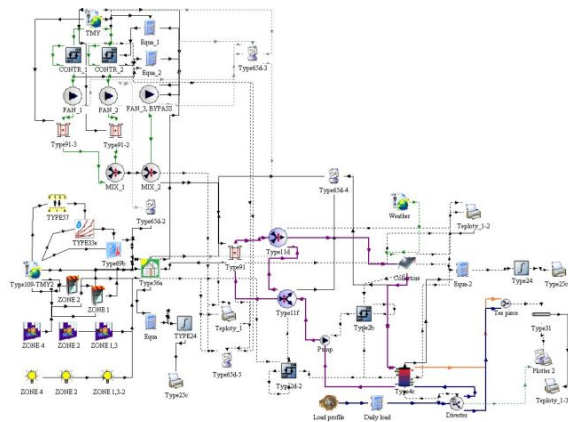
5.2.2 Popis matematického modelu

Matematicky je systém popsán podobně jako byl u "VZT systému 1" popsán výměník tepla. Nicméně tento systém je o dost složitější. Podrobný popis (popis budovy, jednotlivých částí solárního systému,...) je podrobně rozepsán v DizP.

5.2.3 Počítačový model systému

Ve VZT potrubí za VZT jednotkou (přívod čerstvého vzduchu do domu) je umístěn nízkoteplotní výměník tepla (NVT). Účinnost NVT je uvažována 80 %. Solární kapalina začne protékat přes NVT, pokud teplota solární kapaliny na výstupu z akumulární nádoby (dále AKU) je větší o 5 °C než teplota vzduchu v domě. Solární kapalina protéká přes NVT tak dlouho, rozdíl teplot (teplota na výstupu z AKU minus teplota vzduchu v domě) není menší než 2 °C. Průtok přes NVT je vypnut také v případě, že teplota vzduchu v domě překročí 23 °C.

Výpoč. model byl vytvořen v poč. programu Trnsys z jednotlivých komponent - viz obr. 5 pro 6 variant (2 typy budovy; u každé 3 modifikace systému - podrobně viz DizP).



Obr. 5: Model VZT systému, využívající přebytek tepla ze solárního systému.

5.2.4 Výsledky

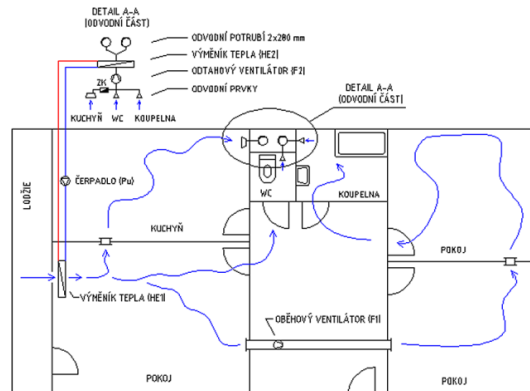
Výsledky výpočtu, včetně výpočtu ekon. návratnosti, jsou uvedeny v kap.6.

5.3 Větrací systém 3

Větrací systém 3 vychází z užitého vzoru [4], patentovaného Ing. Ivanem Cifrinecem. Jedná se o systém větrání se zpětným získáváním tepla pomocí kapalinového okruhu s dvěma oddělenými výměníky tepla.

5.3.1 Popis technického řešení

Větrací systém je navržen a určen převážně pro snadnou instalaci při rekonstrukci větrání bytových domů. Schéma větracího systému je na obrázku 6. Hlavní část větracího systému tvoří systém zpětného získání tepla (dále ZZT). Systém ZZT sestává ze dvou výměníků tepla (dále VT), typu vzduch-voda, vzájemně propojených kapalinovým okruhem. Jeden VT je umístěn v odvodní části, kde odebírá teplo z odváděného vzduchu. Teplo ze vzduchu je předáváno nemrznoucí kapalině, která je pomocí čerpadla transponována do druhého VT, umístěného na přívodu vzduchu. V odvodní části je umístěn ventilátor, který způsobuje v bytě podtlak. Vlivem podtlaku je přes "přívodní" VT nasáván čerstvý venkovní vzduch. Část vzduchu je vedena přímo k odvodní části. Provětrání zadnějších místností je zajištěno pomocí propojovacího potrubí s oběhovým ventilátorem. Transport vzduchu mezi jednotlivými místnostmi je možný díky netěsným dveřím a zvukově izolačním prvkům, zabudovaných ve zdech mezi jednotlivými místnostmi.



Obr. 6: Větrací systém 3 - schéma [7].

5.3.2 Popis matematického modelu

Základem výpočtu jsou vztahy pro výpočet výměníku tepla s konstantní účinností, výpočet potřeby tepla a výpočet potřeby tepla a el. energie. Výpočtové vztahy jsou matematicky popsány v kapitole 5.1.2.

5.3.3 Vlastní model systému

Výpočet energetických úspor větracího systému se zpětným získáváním tepla je proveden během otopného období v následujících třech variantách:

- A) zjednodušený numerický výpočet v programu Excel - 24hodinový denní větrací režim;
- B) numerický výpočet v programu Trnsys - 24hodinový denní větrací režim;
- C) numerický výpočet v programu Trnsys - 16hodinový denní větrací režim.

Ve variantě A je použito s průměrnou teplotou venkovního vzduchu během otopného období 2,3 °C. Ve variantě B, C jsou použita hodinová meteorologická data pro Kuchařovice. Výpočet počítá, jaká je při objemovém průtoku vzduchu $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ potřeba tepla na větrání "bez" a "s" zpětným získáváním tepla pomocí navrženého systému.

5.3.4 Výsledky

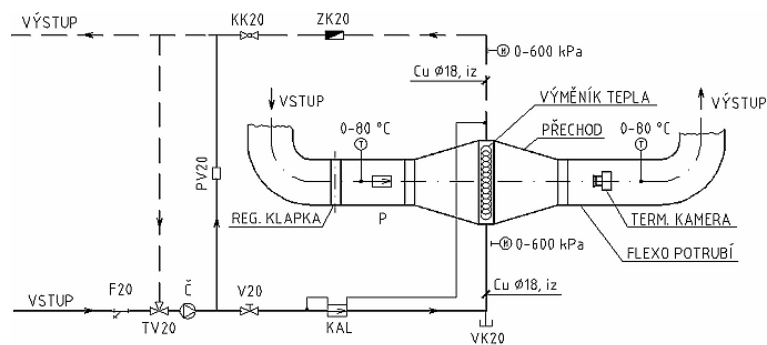
Výsledky výpočtu, včetně výpočtu ekon. návratnosti, jsou uvedeny v kap.6.

5.4 Experimentální měření kompaktního výměníku tepla

V rámci experimentálního měření byl v Brně, na Fakultě stavební, Ústavu technických zařízení budov, vybudován měřicí úsek, sloužící k měření účinnosti nízkoteplotních výměníků tepla ⁴.

5.4.1 Měřicí úsek

Měřicí úsek umožňuje měření jednotlivých parametrů nízkoteplotních výměníků tepla, typu vzduch - voda. Přívod vzduchu je zajištěn pomocí centrální vzduchotechnické jednotky, ve které lze měnit teplotu a objemové průtoky vzduchu. Přívod vody je zajištěn napojením na rozdělovač a sběrač (ohřev vody pomocí plynového kotle). Pomocí regulačního ventilu je možno regulovat teplotu a průtok vody.



LEGENDA ZNAČENÍ:

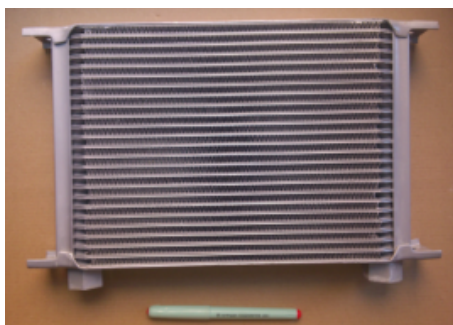
F - FILTR SÍŤOVÝ	P - PRŮTOKOMĚR
TV - TERMOSTATICKÝ SMĚŠOVACÍ VENTIL	T - TEPLMĚR
Č - OBĚHOVÉ ČERPADLO WILO-Star-RS20/4	M - MANOMETR
V - REGULAČNÍ VENTIL	ZK - ZPĚTNÁ KLAPKA
KAL - KALORIMETR	KK - KULOVÝ KOHOUT
VK - VYPOŠTĚCÍ KOHOUT	PV - PŘEPOUŠTĚCÍ VENTIL

Obr. 7: Měřicí úsek.

⁴Měřicí úsek byl vybudován v rámci grantu "FRVŠ 1986/2008/G1 - Měření účinnosti nízkoteplotního výměníku tepla". Řešitel - Ing. Pavel Adam, spoluřešitelé - Ing. Lucie Hořínková, Doc. Ing. Jiří Hirš, CSc.

5.4.2 Měřený výměník tepla

Jako nízkoteplotní výměník tepla byl zvolen kompaktní výměník tepla s velkou teplosměnnou plochou na straně vzduchu. Fotografie výměníku je na obr. 8.



Obr. 8: Kompaktní výměník tepla.

5.4.3 Výsledky měření výměníku tepla

U výměníku tepla byly měřeny jeho tepelné parametry (a následně dopočtena energetická účinnost) a tlaková ztráta na straně vzduchu a na straně vody.

Tepelné parametry VT

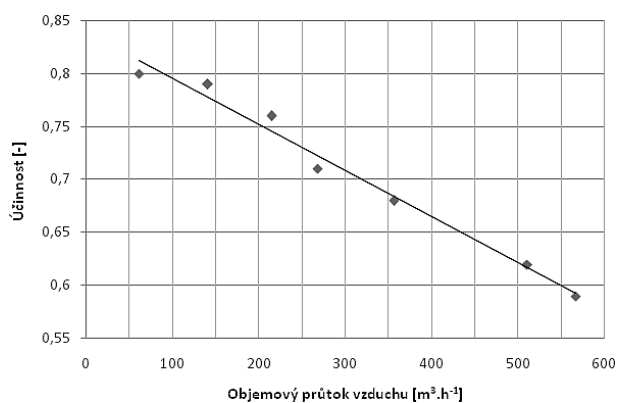
Výsledky měření teplotních parametrů pro různé provozní podmínky jsou na ukázkou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1: Tepelné parametry VT při obj. průtoku vzduchu 60 a 140 m³ · h⁻¹

vzduch (60 m ³ · h ⁻¹)		voda (0,4 m ³ · h ⁻¹)		vzduch (140 m ³ · h ⁻¹)		voda (0,4 m ³ · h ⁻¹)	
t_i [°C]	t_o [°C]	t_i [°C]	t_o [°C]	t_i [°C]	t_o [°C]	t_i [°C]	t_o [°C]
26,5	12,3	8,4	10,0	26,5	14,9	10,3	12,6
26,5	12,1	8,4	9,9	26,5	14,4	10,4	12,4

Energetická účinnost

Na základě naměřených hodnot tepelných parametrů VT byla pomocí vztahů uvedených v kap. 5.1.2 stanovena energetická účinnost pro různé provozní podmínky. Vypočtené hodnoty energetické účinnosti byly vyneseny do grafu (viz obr. 9) a následně proloženy lineární funkcí.



Obr. 9: Účinnost výměníku tepla při různých podmínkách.

Tlaková ztráta VT

Tlaková ztráta byla změřena na straně vzduchu a na straně vody - viz tab. 2.

Tab. 2: Tlaková ztráta VT

strana vzduchu		strana vody	
\dot{V} [m³ · h⁻¹]	Δp [Pa]	\dot{V} [m³ · h⁻¹]	Δp [kPa]
100	< 1	0,2	8
150	< 1	0,3	10
200	1	0,4	11
250	2	0,5	14
300	2	-	-
350	3	-	-

5.5 Experiment. měření vlásečnicových výměníků tepla

Měření vlásečnicových výměníků tepla probíhá na Fakultě stavební, Vysokého učení technického v Brně, od října 2012, ve spolupráci s Fakultou strojního inženýrství, Vysokého učení technického v Brně, v rámci projektu "OP Výzkum a vývoj pro inovace: VUT Energetické zdroje, CZ.1.05/3.1.00/13.0274".

5.5.1 Optimalizace měřící trati

Měřící trať realizovaná v rámci projektu FRVŠ (viz 5.4.1) byla z velké části předělána a optimalizována - dodatečné napojení na odvod vzduchu, přímé napojení na zdroj tepla a chladu, doplnění směšovacího uzlu a regulátoru průtoku na straně vody, doplnění regulační clony (za účelem měření objemového průtoku) na straně vzduchu, kalibrace čidel.

Výsledná podoba optimalizované měřící trati je na obrázku 10.

Měřící trať je přes ústřednu Almemo napojena do počítače, kde je možno on-line zaznamenávat každou vteřinu jednotlivé veličiny (na straně vzduchu - teploty, rel. vlhkosti, objemový průtok, statický a celkový tlak před a za; na straně vody - teploty, hmotnostní průtok a tlak před a za).

Z naměřených hodnot je následně vypočten výkon a tlaková ztráta na straně vody a na straně vzduchu.



Obr. 10: Měřící úsek - optimalizovaný.

5.5.2 Měřené výměníky

Bylo měřeno 6 VT pro zimní a je připravován 1 VT pro měření v letním období. Na ukázkou je jeden typ na obrázku 11(a), který je sestaven ze tří svazků rovných vláken. Vlákna ve svazcích mohou být rovněž načechraná - viz obr. 11(b) a výměník pak tvoří jeden nebo několik svazků.



(a) Výměník 1



(b) Výměník 2 (1 svazek)

5.5.3 Výsledky měření

Výsledky z měření vlásečnicových VT budou publikovány v zahraničních časopisech, nebudou zde tedy plně zveřejněny.

Pro udělení si představy, jsou zde výsledky uvedeny alespoň řádově pro jedny vstupní parametry (teploty a objemové průtoky vzduchu a vody).

Vstupní hodnoty:

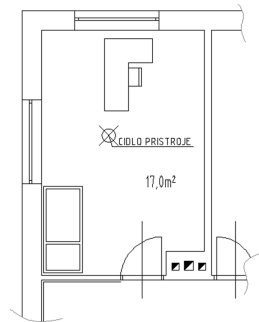
- vstupní teplota vody: 60 °C;
- objemový průtok vody: 130 l/hod;
- vstupní teplota vzduchu: 0 °C;
- objemový průtok vzduchu: 355 m³ · h⁻¹;

Vlásečnicové výměníky tepla (výměník 1 - 6):

- tlaková ztráta na straně vody: 7,9 - 11,6 (27,2 u jednoho z VT) kPa;
- tlaková ztráta na straně vzduchu: 11,4 - 17,7 (254,7 u jednoho z VT) Pa;
- výkon výměníků: 2,5 - 4,1 kW.
- účinnost výměníků: 0,38 - 0,63

5.6 Měření CO₂ v rodinném domě

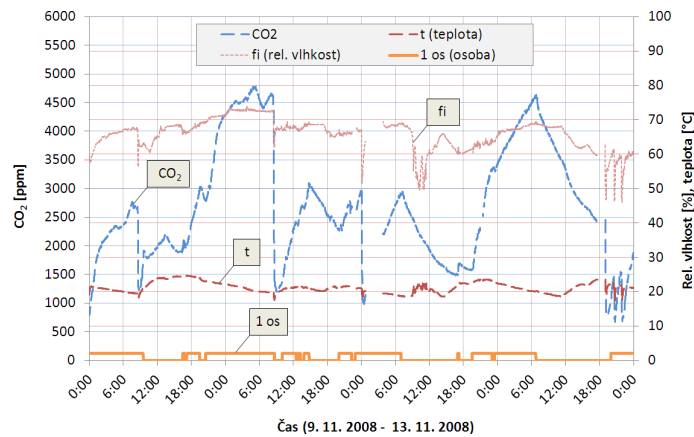
Měření CO₂ bylo provedeno v jednom z pokojů zděného rodinného domu z 90. let, bez větracího systému. Pokoj byl spojen s dalšími dvěma pokoji nětlesnými dveřmi. Okna byla zdvojená dřevěna, těsněná kovovými pásmy (kovotěs). Dispozice pokoje a umístění čidla je na obrázku 11; výsledky z měření na obrázku 12. K měření CO₂, teploty a relativní vlhkosti byl použit přístroj Testo 435-4, se sondou IAQ a datalogger Comet. Větráno bylo pouze příležitostně; otevřením okna o ploše 1,54 m².



Obr. 11: Umístění čidla CO₂ v pokoji

Časy větrání a teploty venkovního vzduchu byly následující: 9. 11. - nevětráno; 10. 11. - větráno 8:30 - 8:40, $t_e = 6,6$ °C; 11. 11. - větráno 0:02 - 0:11, $t_e = 7,6$ °C; 12. 11. - větráno 19:00 - 19:10, 20:32 - 20:42, 21:50 - 22:00, $t_e = 7,5 - 7,8$ °C.

Z výsledků je patrné, že koncentrace CO₂ překračuje mnohonásobně max. dovolenou hodnotu oxidu uhličitého.



Obr. 12: Průběh koncentrace CO₂, relativní vlhkosti a teploty během dne.

6 Závěr

Na základě rešerše byly definovány a řešeny 3 VZT systémy.

U *prvního VZT systému*, a to využití kapalinového ZVT jako zdroj energie pro předehřev/ochlazení čerstvého přiváděného vzduchu, je možno dosáhnout energ. úspor. Ty se v zimním období, při obj. průtoku vzduchu $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, a uvažované teplotě zeminy 4 a 8 °C, pohybují v rozmezí 227 - 359 kWh, při nárůstu potřeby el. energie o 6 kWh. V letním období pak 17 - 38 kWh, při nárůstu potřeby el. energie o 8 kWh. Při uvažované PC 40.000,- jsou zisky poměrně malé a při uvažované životnosti systému 100 let se investice nevrátí.

U *VZT systému 2*, tj. systému kombinující VZT a solární systém, byl výpočet proveden v poč. programu Trnsys pro 2 objekty - nízkoenergetický (NED) a dvoupodlažní (DD) dům - a 6 různých solárních systémů. U NED vychází u jednotlivých variant energ. zisky 49, 59 a 46 kWh za rok (při 2622 kWh/rok/vyt.). U DD jsou energ. zisky 86, 134 a 129 kWh (při 8988 kWh/rok/vyt.). Při uvažované PC 30.000,-, životnosti 30 let, a srovnání s vytápění el. energií, vychází návratnost delší než doba životnosti zařízení.

U *VZT systému 3*, se jedná o systém bytového větrání, s kapalinovým okruhem se dvěma kompaktními výměníky tepla (dále KVT) na přívodu a odvodu vzduchu. Výsledky ukazují, že při objemovém průtoku vzduchu $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ lze, oproti větrání bez zpětného získávání tepla, v zimním období uspořit 1761 - 3148 kWh energie (16-hod a 24-hod provoz), při nárůstu potřeby elektrické energie 173 - 262 kWh. Vzhledem k těmto pozitivním výsledkům byl proveden výpočet ekonomické návratnosti pro 6 variant (různý druh energie na ohřev, cena, typy výměníků, atd.). Doba návratnosti systému se pohybuje v rozmezí 5 - 20 let. Životnost je uvažována 30 let.

V rámci experiment. výzkumu byl vybudován měřicí úsek umožňující měření VT. Následně proběhlo experiment. měření KVT z běžných materiálů (ocel, hliník, měď). Ukázalo se, že vybraný výměník je vhodný pro instalaci v navržených systémech. Jeho účinnost se pohybuje v rozmezí 58 % - 82 % (při obj. průtocích vzduchu $570 - 55 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), s tlakovou ztrátou na straně vody 8 - 14 kPa, na straně vzduchu 1 - 10 Pa.

Měřicí úsek byl optimalizován a měřeny různé vlasečnicové výměníky tepla. Jejich účinnost se pohybuje v rozmezí 38 - 63 % (při obj. průtocích vzduchu $300 - 900 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Tlaková ztráta na straně vody je 7,9 - 11,6 kPa, na straně vzduchu 11,4 - 17,7 Pa. Výměníky jsou nadáleny vyvíjeny a optimalizovány.

Výsledky z měření CO₂ v RD ukazují, že hodnoty koncentrace CO₂ se blíží k hodnotě 5000 ppm. Přitom max. povolená hodnota je 1200 ppm.

6.1 Význam pro praxi

V dnešní době je v ČR malé procento bytů a rodinných domů, které jsou vybaveny účinným vzduchotechnickým systémem se zpětným získáváním tepla a využívajících nízkoteplotních/obnovitelných zdrojů energie. Potřeba zajištění účinné výměny vzduchu v budovách je stále podceňována.

Tato dizertační práce se zabývá třemi VZT systémy (VZT - 1, 2, 3⁵), kde u všech je proveden teoretický výpočet ročního provozu. Experimentálně jsou měřeny běžné a vláseničnicivé výměníky tepla a kvalita vzduchu z pohledu CO₂ v rodinném domě. Přínosy pro praxi jsou následující:

- VZT - 1, 2, 3 - je sestaven výpočtový model systému, umožňující výpočet energetické náročnosti systému pro různé okrajové podmínky.
- VZT - 1, 2, 3 - pro definované okrajové podmínky je spočten roční energetický přínos a ekonomická návratnost investice.
- VZT - 1, 2, 3 - jsou definovány závěry, vyplývající z výsledků výpočtu. Ty přispějí k lepšímu rozhodování při volbě VZT systému a jeho návrhu.
- V laboratoři na Fakultě stavební, Ústav technických zařízení budov je zrealizován a optimalizován funkční měřicí úsek, umožňující měření výkonu a tlakových ztrát KVT.
- Experimentálně změřen, s následným vyhodnocením naměřených hodnot, výměník tepla z běžných materiálů (ocel, hliník, měď). Ten může být použit ve VZT systémech.
- Experimentálně změřeny, s následným vyhodnocením naměřených hodnot, 7 typů vláseničnicových výměníků tepla. Tyto výměníky by v budoucnu mohly najít uplatnění v řadě technických prvků/zařízení (ohřívače, chladiče, fan-coily, otopná tělesa, atd.)
- Experimentálně změřena kvalita vzduchu z pohledu CO₂ v rodinném domě, která přispěje k lepšímu návrhu VZT zařízení a úspore energie.

Všechny dosažené výsledky byly prezentovány v časopisech a na seminářích. Závěry z řešených úloh poslouží projektantům ke kvalitnímu návrhu VZT systémů a jejich provozu, což povede k výrazným úsporám energie. Velkým přínosem pro praxi je již zmíněný optimalizovaný měřicí úsek, určený k měření výměníků tepla. Ten je již v současné době bohatě využíván pro řadu praktických měření. Byly zde měřeny 2 nové typy fan-coilů a v současné době probíhá měření vláseničnicových výměníků tepla a vývoj nového typu otopného tělesa.

⁵VZT - 1 - systém s kapalinovým zemním VT, VZT - 2 - systém, využívající přebytek tepla ze solárního systému, VZT - 3 - systém bytového větrání se ZZT pomocí dvou VT, vzájemně propojených kapalinovým okruhem

6.2 Význam pro rozvoj vědního oboru

V rámci dizertační práce byly podrobně řešeny 3 VZT systémy, sestaven měřicí úsek k měření VT, změřen KVT, různé typy vlásečnicových VT a koncentrace CO₂ v RD. Všechny dosažené výsledky byly publikovány, příp. se připravují k následnému publikování. Poslouží jako podklad k dalšímu výzkumu.

Možnosti dalšího výzkumu

U *VZT systému 1* se nabízí možnost počítač. modelování systému v interakci s různými typy budov. V této práci byl výpočet proveden za zjednodušených okraj. podmínek, kdy byla uvažována konstantní teplota zeminy příp. studniční vody (2 teploty pro zimu, 2 pro léto). V podrobnějším modelu je možno kalkulovat s teplotními změnami zeminy. Vhodné by bylo provést měření v reálných podmínkách a následně provést validaci výpočet. modelu systému.

VZT systém 2 se podle výsledků z počítačového modelování ukázal jako ne příliš výhodný. Nicméně na tomto případě byl sestaven podrobný výpočetní model v počítačovém programu Trnsys, který poslouží jako podklad pro další modifikaci a výpočet systému.

U *VZT systému 3* byly výpočtem získány velmi pozitivní výsledky. Možnosti budoucího výzkumu jsou zde následující:

- Výpočet provozu systému, v počítačovém programu Trnsys, pro jiné okrajové podmínky (tj. velikost a provoz objektu, meteorologická data, ...).
- Počítové modelování v programu CFD (computational fluid dynamics), umožňující vizualizaci proudění vzduchu v budově. Optimalizace umístění přírodních a přepouštěcích prvků (výustek).
- Realizace systému v laboratorních a v reálných podmínkách.
- Experimentální měření systému v průběhu roku.
- Validace počítačového modelu s naměřenými hodnotami.
- Optimalizace jednotlivých prvků systému (výměníky tepla, výustky, ...) a systému jako celku.
- Finální návrh systému a uvedení do provozu.

V rámci experimentální výzkumu se nabízí následující možnosti:

- Návrh vlásečnicových výměníků tepla pro vzduchotechnický systém 3 pro různé objemové průtoky vzduchu.
- Experimentální změřením a optimalizace navržených výměníků.
- Dlouhodobé testování životnosti navržených výměníků.
- Měření kvality vzduchu CO₂ v objektech se vzduchotechnickým systémem 3 a následná optimalizace množství přiváděného vzduchu.

Literatura

- [1] ADAM, P.: Systém pro ohřev čerstvého venkovního vzduchu pomocí tepelných zisků ze sol. kolektorů. [UV]. VUT v Brně.
URL <www.upv.cz>
- [2] ADAM, P.: Větrání bytových domů. In *Sborník přednášek konference Budovy s téměř nulovou spotřebou energie.*, Brno: Litera, 2012, s. 42–47.
- [3] CHARVÁT, P.; JÍCHA, M.; de GIDS, W.; aj.: Hybridní větrací systém pro obytné budovy. *Vytápění, větrání, instalace*, , č. 3, 2005, ISSN 1210-1389.
- [4] CIFRINEC, I.: Systém centrálního a/nebo decentrálního větrání, zejména v bytových a panelových domech. [UV].
URL <www.upv.cz>
- [5] CONCANNON, P.: Residential Ventilation. [on-line].
URL <www.aivc.org>
- [6] GEBAUER, G.; RUBINOVÁ, O.; HORKÁ, H.: *Vzduchotechnika*. Brno: ERA, druhé vydání, 2005, ISBN 80-7366-027-X, 262 s.
- [7] HIRŠ, J.; ADAM, P.: Využití odpadního tepla u bytového větrání. *Topenářství*, , č. 1, 2012, ISSN 1211-0906.
- [8] LADENER, H.; SPATE, F.: *Solární zařízení*. Praha: Grada Publishing, a. s., 2003.
- [9] MANSSON, L.-G.: Evaluation and Demonstration of Domestic Ventilation Systems. [on-line].
URL <www.ecbcs.org>
- [10] MICHAEL, K.: Zemní výměník tepla k předehřívání vzduchu v zimě a předchlazení vzduchu v létě. In *Pasivní domy 2007*, Brno: Centrum pasivního domu, 2007, ISBN 9788-80-254-0126-2.
- [11] *TRNSYS 16 - Mathematical Reference*. [Technická dokumentace]. Svazek 5. c2006, the Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.

Životopis

Osobní údaje a kontaktní údaje

Jméno a příjmení: Pavel Adam
 Trvalé bydliště: Křížínkov 37, 594 53 Osová Bítýška
 Kontaktní údaje: tel.: 541147938, e-mail: adam.p@fce.vutbr.cz

Vzdělání

- *Vysoké učení technické v Brně*
 Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov
 2013/2014 - předpokládané obhájení dizertační práce (titul Ph.D.)
- Ing. *Vysoké učení technické v Brně*
 Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav,
 Odbor termomechaniky a techniky prostředí
 2006 - úspěšné ukončení studia
- *Obchodní akademie, Brno, Kounicova*
 2004 - úspěšné ukončení studia

Zahraníční pobyty

Technická univerzita v Dánsku, Lyngby, 01/2009 - 06/2009

Výzkum energeticky úsporných větracích systémů.
 Vedoucí: Assoc. prof. Toke Rammer Nielsen.

Praxe/zaměstnání

Vysoké učení technické v Brně, Rektorát, Brno, 10/2012 - 09/2013

Odborný pracovník - technik pro projekt č. CZ.1.05/3.1.00/13.0274
 VUT Energetické zdroje (úvaz. 100 %)

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 12/2011 - souč.

Technik laboratoře (úvaz. 50 %, od 10/2012 úvaz. 30 %)

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 10/2011 - souč.

Asistent - předměty vytápění, větrání (úvaz. 20 %)