

Zemní výměník tepla – vyhodnocení měřených dat a tepelně-vlhkostní simulace

Ing. Pavel Kopecký, ČVUT, Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

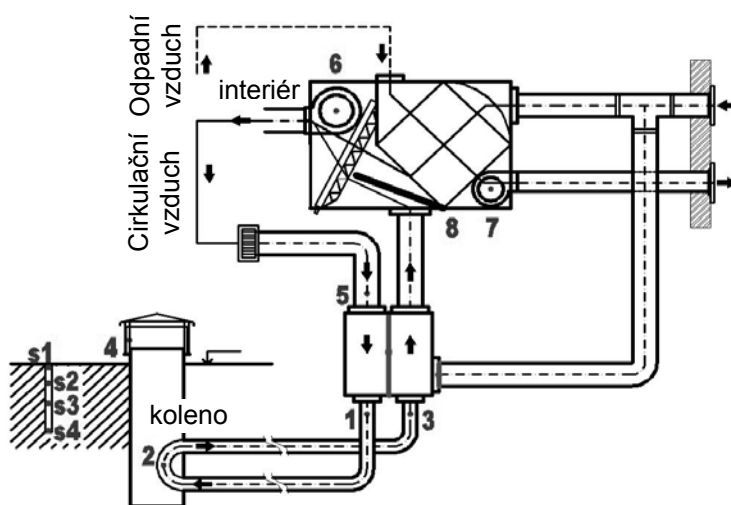
Tel: +420 224 354 473, e-mail: pavel.kopecky@fsv.cvut.cz

Abstrakt: Pasivní dům v Rychnově u Jablonce nad Nisou je monitorován od září 2005. Příspěvek se zabývá vyhodnocením některých měřených dat za rok 2006. Výsledky ukazují na některé tendence ve vlhkostrním chování monitorovaného zemního výměníku tepla. Mimo pouhé vyhodnocení měřených dat je provedena krátkodobá tepelně-vlhkostní simulace provozu zemního výměníku tepla. Výsledky simulace jsou porovnány s měřením. Toto porovnání slouží jako základní experimentální validace použitého numerického modelu.

1. Úvod

Nucené větrání s rekuperací a zemním výměníkem tepla (dále v textu ZVT) pasivního domu v Rychnově u Jablonce nad Nisou [1] jsou monitorovány od začátku září 2005 (spolupráce ČVUT, FSv a ATREA s.r.o.). Dům je obýván čtyřčlennou rodinou (2 dospělí, 2 děti). Měřená data zejména umožňují podrobně sledovat způsob provozování systému větrání včetně spotřeb elektrické energie na pohon ventilátorů, vazbu mezi výměnou vzduchu a kvalitou vnitřního prostředí, vazbu mezi ZVT a systémem větrání. Data dále slouží k validaci dynamického modelu ZVT [2], který umožňuje sledovat a vyhodnocovat tepelně-vlhkostní chování ZVT v průběhu modelového období.

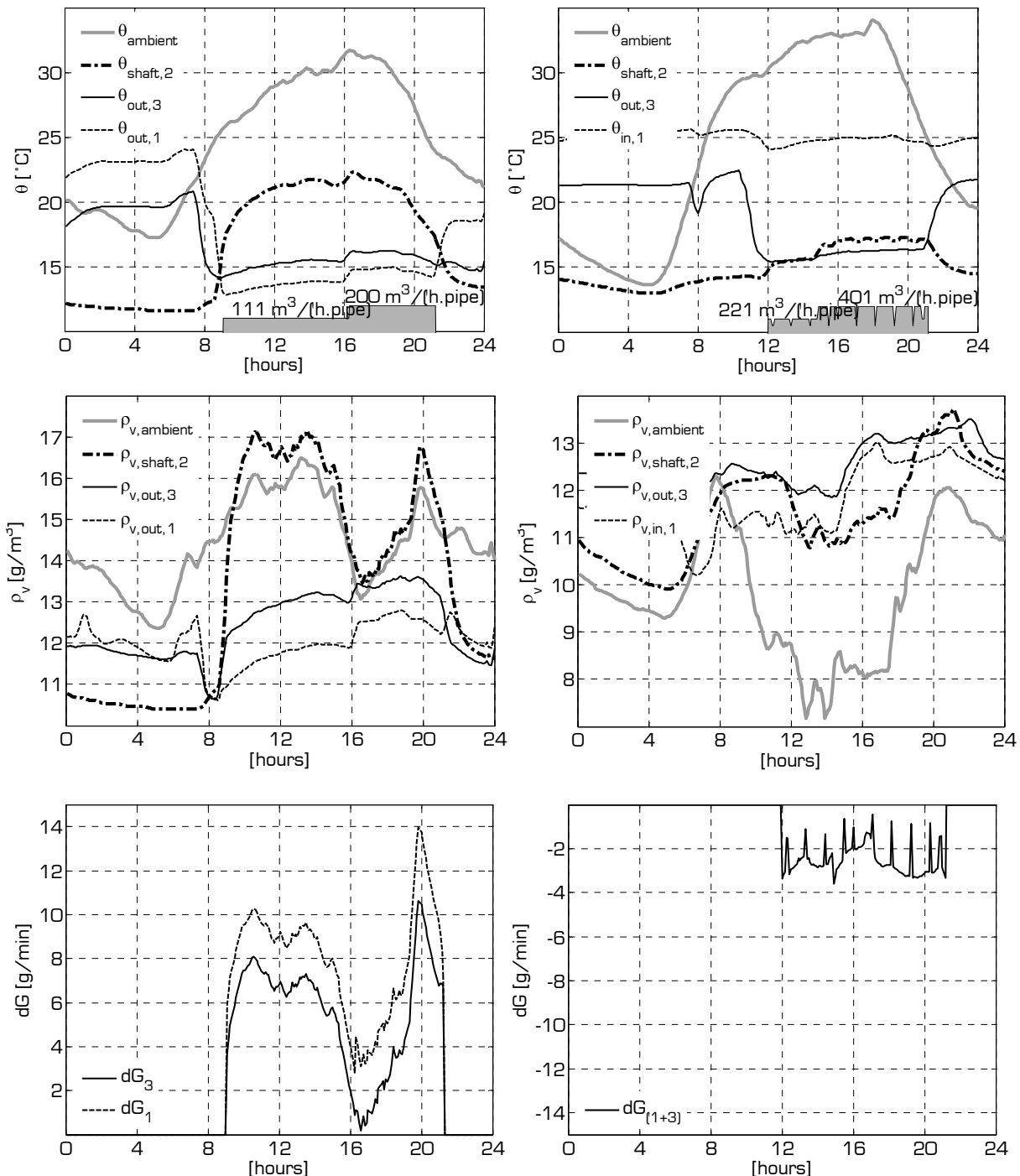
Základní informace k ZVT jsou uvedeny v [3]. Zajímavostí ZVT je, že pro chlazení budovy je možné využít cirkulačního provozu ZVT (viz obrázek 1). Data jsou sbírána do měřicí ústředny (vzorkovací frekvence 1 min) a do tří nezávislých dataloggerů. Jeden z dataloggerů je umístěn v nasávací šachtě (sensor 2 a 4, obr. 1), druhý je umístěn uvnitř domu (obývací pokoj) a sbírá informace o teplotě, relativní vlhkosti a koncentraci CO₂ vnitřního vzduchu (vzorkovací frekvence 5 min). Třetí datalogger sbírá informace o teplotě zeminy (body s1 až s4, vzorkovací frekvence 15 min) z 1 m hlubokého vrtu (od 18.12.2006).



Obr. 1 Schéma monitorovaného systému s umístěním čí-

2. Ukázka denních měřených dat

Ukázka vybraných denních měřených dat je na obrázku 2. Levý sloupec zobrazuje vybraný den (20.6.2006), kdy bylo využíváno režimu přímého sání přes ZVT. Pravý sloupec zobrazuje vybraný den (19.7.2007), kdy bylo využíváno cirkulačního režimu ZVT.



Obr. 2 Měření teploty θ [°C], koncentrace vodní páry ρ_v [g/m³] a celkový vlhkostní tok dG [g/min] pro dva vybrané dny. Vlhkostní tok dG je výsledkem možné kondenzace a evaporace vodní páry v potrubí (kladné hodnoty ukazují na převažující kondenzaci v potrubí, záporné na převažující evaporaci). Pozn.: hodnoty měřené ve spojícím kolenu jsou patrně ovlivněny nechtěným přísáváním vzduchu přes netěsné spoje kolena (viz profil $\rho_{v,shaft,2}$).

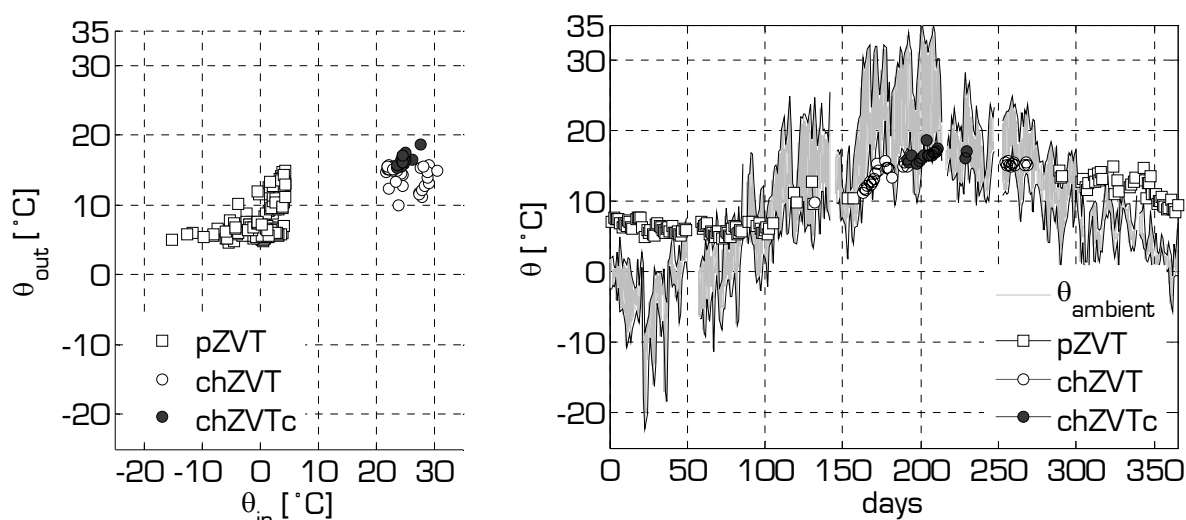
Příklad přímého sání venkovního vzduchu přes ZVT (obrázek 2, vlevo) demonstruje překvapivý chladicí efekt samotné vstupní šachty (ochlazení vnějšího vzduchu až o 8 °C). Odezva teploty vzduchu na výstupu ze ZVT na zdvojnásobení průtoku vzduchu není příliš znatelná, změna teploty je nižší než 1 °C. Zvýšení průtoku (tj. rychlosti proudění) je téměř vyváženo souvisejícím zvýšením součinitele přestupu tepla konvekcí. Rozdíl mezi koncentrací vodní páry vstupujícího vzduchu a vystupujícího vzduchu naznačuje převažující kondenzaci v potrubí. Zkondenzované množství je v řádu několika kilogramů během dne. Poněvadž potrubí v hloubce dvou metrů vykazuje o trochu vyšší ochlazení vzduchu, je jeho kondenzující množství vyšší než horní potrubí uložené v hloubce jednoho metru.

Rozdílné vlhkostní chování je patrné z ukázky cirkulačního provozu ZVT (obrázek 2, vpravo). Ačkoliv je teplota vzduchu na výstupu ze ZVT podobná jako v případě přímého sání přes ZVT, rozdíl mezi koncentrací vodní páry vstupujícího vzduchu a vystupujícího vzduchu naznačuje převažující evaporaci v potrubí. Voda přítomná v potrubí je pravděpodobně důsledkem předchozí kondenzace. Ačkoliv je průtok přes jedno potrubí dvakrát vyšší než v případě přímého sání, bylo vypařujícího množství několikrát nižší než kondenzující. Toto nastává pravděpodobně proto, že vlhká oblast je omezena pouze na tenký proužek vody na dně potrubí.

Výše prezentované příklady by neměly vést k závěru, že cirkulační režim přes ZVT je absolutním lékem na kondenzaci vodní páry v potrubí. I při cirkulaci vzduchu přes ZVT může kondenzace v rámci potrubí převažovat. Klíčové vstupní parametry jsou koncentrace vodní páry ve vstupním vzduchu, teplota okolní zeminy, průtok vzduchu a délka zemního výměníku tepla.

3. Některá měřená data z roku 2006

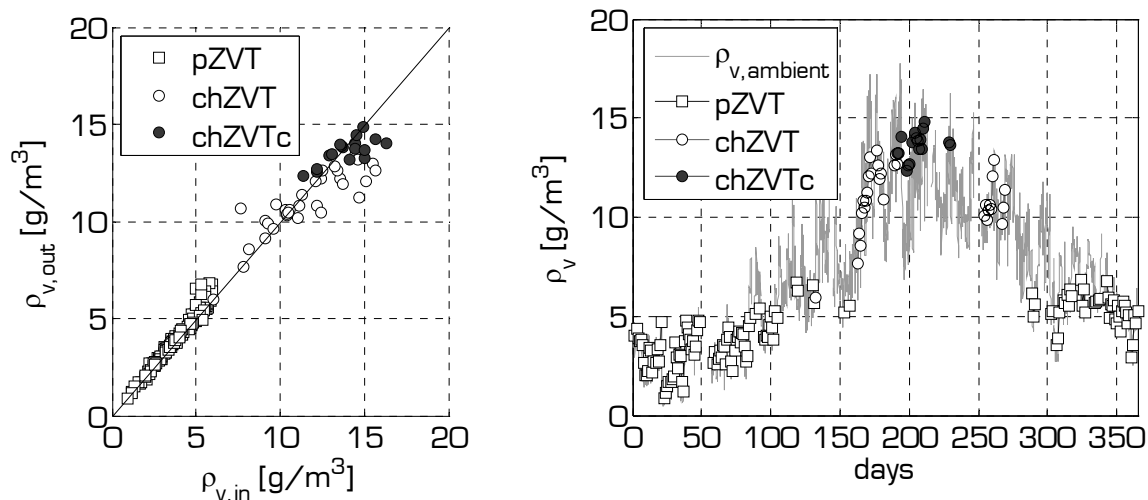
3.1. Teplota vzduchu na výstupu ze ZVT



Obr. 3 Vlevo – teplota vzduchu na výstupu ze ZVT (θ_{out}) rozříděná podle teploty vzduchu vstupujícího do ZVT (θ_{in}). Vpravo – průběh roku 2006. Vysvětlivky: $\theta_{ambient}$ jsou hodinové průměry teploty vnějšího vzduchu. Hodnoty teplot vzduchu na výstupu ze ZVT jsou denní průměry; pZVT – předeřhev, přímé sání přes ZVT; chZVT – chlazení, přímé sání přes ZVT; chZVTc – chlazení, cirkulační režim ZVT.

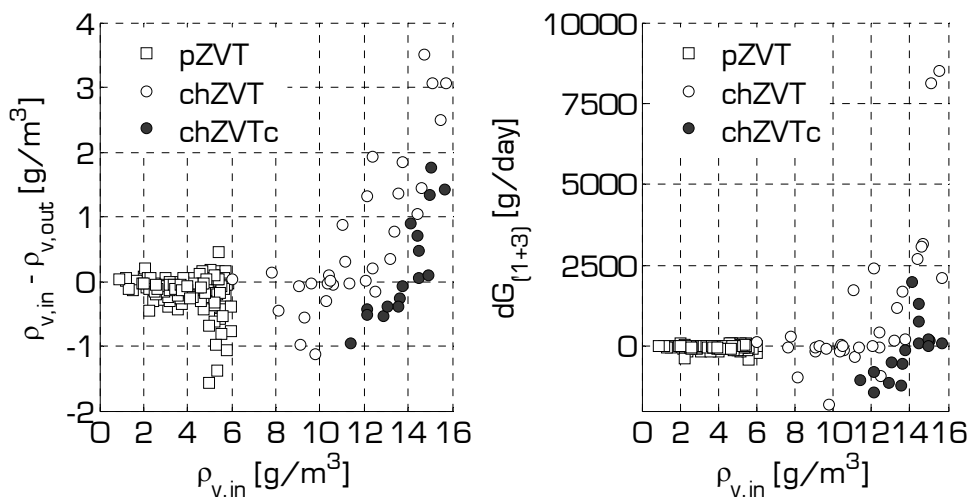
Průběh teplot vzduchu na výstupu ze ZVT (obrázek 3) dobře ilustruje dlouhodobé teplotní chování ZVT. Klesající teplota vzduchu na výstupu ze ZVT během období předehřevu vzduchu (z 14 °C na počátku podzimu až na 5 °C koncem zimy) je důsledkem provozu ZVT a zejména důsledkem přirozeně klesající teploty v zemině během otopného období (vazba na tepelnou bilanci povrchu země).

3.2. Koncentrace vodní páry ve vystupujícím vzduchu ze ZVT



Obr. 4 Vlevo – koncentrace vodní páry ve vystupujícím vzduchu ze ZVT ($\rho_{v,out}$) rozříděná podle koncentrace vodní páry ve vstupním vzduchu ($\rho_{v,in}$). V případě cirkulačního provozu vstupuje do ZVT vzduch z interiéru domu. Vpravo – průběh roku 2006. Vysvětlivky: $\rho_{v,ambient}$ jsou hodinové průměry koncentrace vodní páry ve vnějším vzduchu. Hodnoty koncentrací vodní páry ve vystupujícím vzduchu z ZVT jsou denní průměry; pZVT – předehřev, přímé sání přes ZVT; chZVT – chlazení, přímé sání přes ZVT; chZVTc – chlazení, cirkulační režim ZVT.

3.3. Vlhkostní bilance ZVT

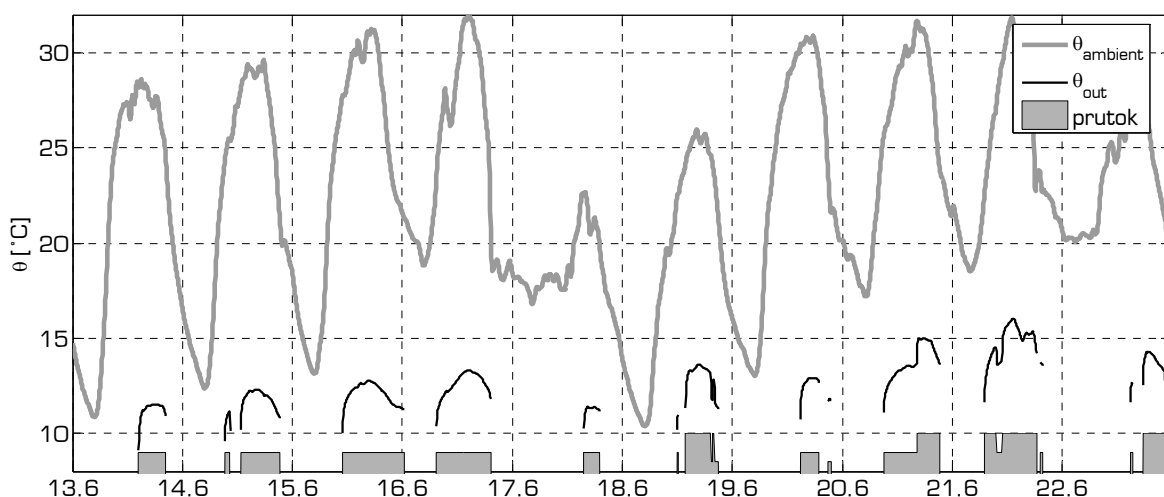


Obr. 5 Vlevo – rozdíl mezi koncentrací vodní páry ve vstupním ($\rho_{v,in}$) a vystupujícím vzduchu ze ZVT ($\rho_{v,out}$) rozříděná podle koncentrace vodní páry ve vstupním vzduchu ($\rho_{v,in}$), kladné hodnoty znamenají převažující kondenzaci v potrubí, záporné hodnoty znamenají převažující evaporaci v potrubí. Vpravo – celkový vlhkostní tok (dG) rozříděný podle koncentrace vodní páry ve vstupním vzduchu ($\rho_{v,in}$). Vysvětlivky: pZVT – předehřev, přímé sání přes ZVT; chZVT – chlazení, přímé sání přes ZVT; chZVTc – chlazení, cirkulační režim ZVT.

Poněvadž potrubí bylo během období přehřevu suché, je vlhková bilance v tomto období vyrovnaná (viz obrázek 4, vlevo). Nedochází k žádnému vlhčení ani ztrátě vodní páry, vzduch se v ZVT pouze ohřívá (obrázek 3) a z tohoto důvodu klesá jeho relativní vlhkost. Deficit vodní páry během letního období (obrázek 5, vlevo) by mohl naznačovat slabší tendenci ke kondenzaci při cirkulačním provozu ZVT. Avšak, vlhková chování ZVT je závislé zejména na dlouhodobém teplotním chování zeminy, které je řízeno tepelnou bilancí zemského povrchu. Poněvadž bylo cirkulačního režimu využito až ve druhé polovině léta (11.7.2006 to 10.9.2006), kdy se teplota zeminy v hloubce uložení potrubí blíží svému ročnímu maximu, byly teploty vzduchu na výstupu ze ZVT v případě cirkulačního provozu vyšší než v případě přímého sání přes ZVT. Tendence ke kondenzaci je obecně nejsilnější na jaře, kdy je teplota v zemině nízká z důvodu právě skončeného zimního období.

4. Krátkodobá tepelně-vlhkostní simulace ZVT

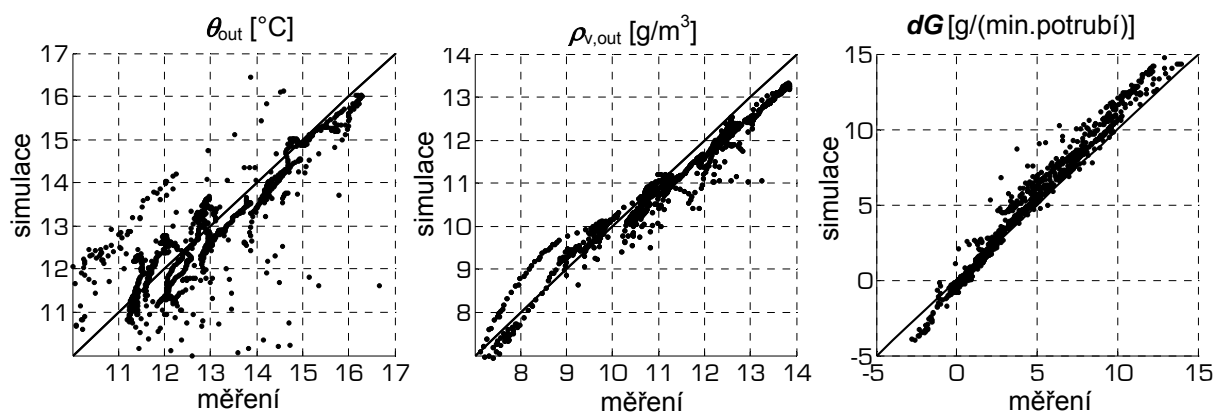
Simulace je zaměřena na velmi teplé letní období 13.6.2006 – 22.6.2006, které bylo typické velmi vysokými teplotami vnějšího vzduchu a intenzivním využíváním ZVT během denních hodin (obrázek 6). ZVT byl využíván v režimu přímého sání. Simulováno bylo pouze spodní potrubí, vzájemný vliv potrubí byl zanedbán. Do simulace také nebyla zahrnuta tepelná bilance povrchu země. Výpočetní doménou byl blok zeminy s rozměry 1.18 m x 1.18 m x 23 m (délka ZVT) s adiabatickými vnějšími okrajovými podmínkami. Tento blok byl rozdělen na 17 x 17 x 46 konečných objemů. Kruhové potrubí bylo nahrazeno ekvivalentním čtvercem o stejném obvodu jako má potrubí. Časový krok výpočtu byl 5 minut. Počáteční teplota bloku zeminy byla uvažována 8.5 °C. Tato teplota byla odvozena pomocí lineární regrese měřených tepelných výkonů ZVT během sledovaného období.



Obr. 6 Teplota venkovního vzduchu (θ_{ambient}), teplota vzduchu na výstupu ze ZVT (θ_{out}) předpovězená pomocí numerické simulace a graficky zobrazený provoz ZVT během simulovaného období (13.6.2006 – 22.6.2006).

Výsledky numerické simulace byly porovnány s měřenými daty. Toto porovnání slouží jako první analytická validace vyvinutého modelu pro simulaci ZVT. Korespondence s měřenými daty je viditelná, i když přesnost samozřejmě není absolutní (obrá-

zek 7). Výborným a málo očekávaným výsledkem (alespoň pro autora) je dobrá práce algoritmu pro výpočty s vlhkým vzduchem.



Obr. 7 Porovnání simulace s měřením. Teplota vzduchu na výstupu (θ_{out}), koncentrace vodní páry na výstupu ($\rho_{v,out}$) a celkový vlhkostní tok (dG).

5. Závěr

Monitoring reálného ZVT představený v tomto příspěvku je dostatečně detailní pro robustní experimentální validaci vyvinutého numerického modelu ZVT. Přestože bylo dosaženo relativně dobré přesnosti, simulace ZVT by měla být považována za obtížnou z důvodů nízkých předávaných tepelných toků vzduch-zemina, velmi přerušovaného provozu ZVT a zejména vlhkostních toků v potrubí. Další prověření numerického modelu je potřebné.

Kondenzace vodní páry v potrubí nemůže být úplně vyloučena v středoevropském podnebném pásu. Otázka možného růstu plísní by proto měla zůstat otevřená, ačkoliv některé studie obavy nepotvrdily (viz např. [4])

Poděkování: Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT ČR, projekt 1M6840770001, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS. Autor také velmi děkuje manželům Jindrákovým za laskavé umožnění provozního sledování ZVT a společnosti Atrea s.r.o za spolupráci při vyhodnocování dat.

6. Literatura

- (1) JINDRÁK, M.: *Pasivní dům v Rychnově*. In *Tepelná ochrana budov*, 1/2005.
- (2) KOPECKÝ, P.: *Zemní výměník tepla: model a validace*. In *VVI* 4/2006.
- (3) KOPECKÝ, P.: *K energetickému přínosu zemního výměníku tepla*. Sborník konference *Pasivní domy 2006*.
- (4) FLUCKIGER, B., MONN, C.: *Microbial investigations and allergen measurements in ground-coupled earth-to-air heat exchangers*, 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, UK, Garston, BRE, 1999

Abstract:

A passive family house using mechanical ventilation system equipped with heat recovery and a simple earth-to-air heat exchanger (EAHX) is being monitored since the end of summer 2005. The paper deals with the evaluation of measured data collected during year 2006. Amongst others, the results show the tendencies in moisture performance of monitored EAHX. Besides pure data evaluation, the short-term hygro-thermal simulation of EAHX was performed with a numerical model specially developed for this purpose. The simulation is compared with the monitored data; the comparison serves as the basic experimental validation of the model.

The extensive long-term monitoring introduced in this paper and numerical simulation in particular bring information about processes taking place during EAHX operation. The monitoring is detailed enough for a robust experimental validation of the developed EAHX model. Despite relatively good accuracy of the numerical simulation achieved in the example of simulation, the accurate simulation of EAHX should be considered as rather difficult because of low air-to-soil heat flow, the intermittent pattern of EAHX operation, and moisture flow in the pipes.

The condensation inside the pipes can not be eliminated completely in climate of middle Europe. Therefore, the question of mould growth inside pipes should remain open, although the several existing studies, e.g. [4], have not confirmed any hygienic problems.