

Ing. Vladimír ZMRHAL, Ph.D.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

Tepelné prostředí v prostoru s kapilárními rohožemi



Ústav techniky prostředí

Thermal Environment in a Space with Capillary Mats

Recenzent

doc. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.

Článek analyzuje výsledky měření tepelného stavu prostředí u velkoplošného systému vytápění a vysokoteplotního chlazení. Rozebírá možnosti využití systémů s kapilárními rohožemi, nezabývá se však ekonomickým hodnocením systému ani návratností investic.

Klíčová slova: vytápění, chlazení, kapilární systém

In the article the author analyzes the experimental results of measuring the thermal environmental conditions of large-area heating and high-temperature cooling systems. Presented are assessments of the potential of using systems with capillary mats, however, it deals neither with an economic evaluation of such a system, nor with a return on investment.

Key words: heating, cooling, capillary system

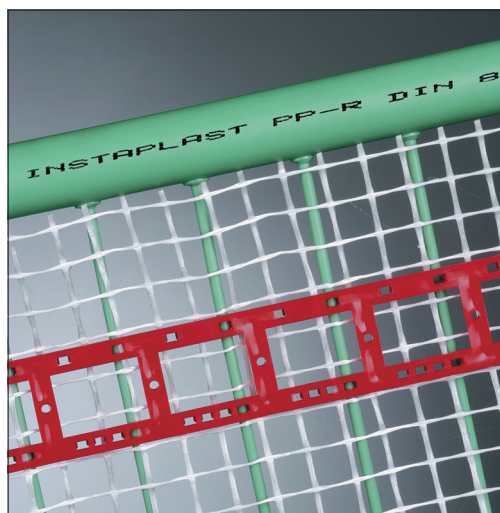
V posledních letech zaznamenaly velkoplošné sálavé systémy prudký rozmach zejména v západní části Evropy. Pro své výhody se sálavé systémy začínají pomalu uplatňovat i u nás, i když investičně jsou stále poměrně náročné. Jedním z nových sálavých systémů, jehož výroba je uskutečňována i na našem území, je systém s kapilárními rohožemi.

KAPILÁRNÍ SYSTÉM

Kapilární rohože jsou tvořeny sítí tenkých plastových trubiček z polypropylenu (vnější $\varnothing$ cca 3,5 mm) do nichž je rozváděna chladicí, nebo otopná voda. Mezi jednotlivými kapilárami je poměrně krátká vzdálenost (cca 30 mm), což ve spojení s malým teplotním spádem způsobí prakticky rovnoměrné rozložení povrchové teploty. Nejčastěji se rohože umísťují pod omítku na strop, ale mohou být umístěny i na stěnách místnosti. V některých aplikacích je možné jejich umístění i v podhledové konstrukci, či v podlaze. Díky malým rozměrům kapilárních trubiček je tloušťka omítky 10 až 15 mm. Ta umožňuje poměrně rychlou reakci celého systému na změnu okrajových podmínek.

Kapilární rohože je možné vyrábět prakticky v libovolných rozměrech, přesně dle objednávky na konkrétní zakázku. Na stavbu jsou kapilární rohože dodávány jako celky připravené pro montáž na konstrukci stěny, podlahy nebo stropu.

Zatímco u chlazení je teplota vstupní vody omezena rizikem kondenzace na stěnách, u vytápění je omezující podmínkou asymetrie radiální teploty.



Obr. 1
Detail
kapilárního
systému

Maximální provozní teplota systému s kapilárními rohožemi vyrobeného z polypropylenu je 65 °C. Běžně se teplota otopné vody například pro podlahové vytápění pohybuje do 40 °C, tak aby nebyla překročena maximální přípustná povrchová teplota 29 °C. V případě použití systému pro chlazení se teplota přírodní vody t_{w1} volí ≥ 16 °C, z důvodu zabránění kondenzace vodních par obsažených ve vzduchu na stěnách místnosti. Teplotní rozdíl odváděné a přiváděné vody bývá 2 až 4 K.

Velká teplosměnná plocha umožňuje vytápět prostor při poměrně nízké teplotě otopné vody. Ve spojení s malou tepelnou ztrátou objektu (nízkoenergetické domy) bude teplota vody blízká teplotě vzduchu v prostoru. Naopak chlazení probíhá s poměrně vysokými teplotami chladicí vody (až 24 °C).

APLIKACE SYSTÉMU

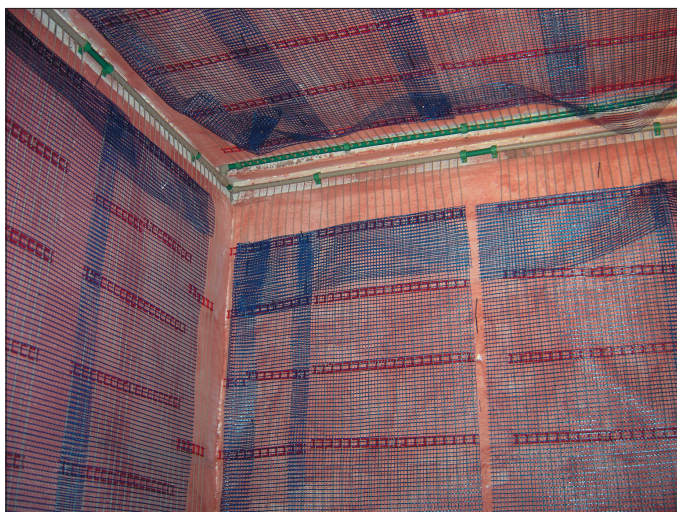
Kapilární systém je možné použít prakticky v jakékoliv budově. Nízká stavební výška konstrukce s kapilárním systémem (cca 40 mm vč. izolace) umožňuje široké využití pro novostavby i rekonstrukce budov. Uvedený případ je aplikací systému v nízkoenergetickém domě, ale lze ho použít i pro běžné rodinné, či bytové domy. Vzhledem k vyšším tepelným ztrátám takových objektů by systém pracoval s vyšší teplotou otopné vody resp. s nižší teplotou vody chladicí.

Kapilárním systémem lze odvádět pouze citelnou tepelnou zátěž. Běžně se měrné chladicí výkony a výkony pro vytápění pohybují v hodnotách uvedených v tab. 1.

Jak již bylo popsáno výše, kapilární rohože je možné umístit na libovolnou stěnu místnosti. Volba příslušných stěn by měla odpovídat architektonickému návrhu prostoru (nebezpečí zastavení nábytkem). Před vlastní pokládkou rohoží se na stěny místnosti umístí nejprve tepelná izolace. Při kladení izolačních desek je nutné vytvořit drážky pro zabudování rozvádě-

Tab. 1 Měrný tepelný výkon kapilárních rohoží q [$W/(m^2 \cdot K)$] v závislosti na rozdílu povrchové teploty stěny a teploty vzduchu

		Vytápěná plocha			Ochlazovaná plocha		
$t_p - t_i$	[K]	2	5	10	2	5	10
Svislé stěny	q [W/(m ² .K)]	16	40	80	16	40	80
Podlaha	q [W/(m ² .K)]	17	43	87	14	36	72
Strop	q [W/(m ² .K)]	14	36	72	17	43	86



Obr. 2 Montáž kapilárního systému na stěny a strop místnosti

cího a sběrného potrubí (obr. 3). Pokud jsou izolační desky připraveny jako podklad pro omítku, je možné začít s pokládkou kapilárních rohoží.

Rohože se nejprve rozmístí na stěny dle plánu pokládky a připevní se ke stěně. Takto připevněné kapilární rohože se mezi sebou spojí polyfúzním svařováním. Po připojení potrubí na zdroj tepla/chladu je ještě nutné provést tlakovou zkoušku. Po úspěšných tlakových zkouškách je možné nanést omítku o minimální tloušťce (zpravidla 10 mm). V případě, že dojde vlivem neopatrného zacházení k narušení některé z kapilár např. nežádoucím navrtáním, lze kapiláru částečně odkrýt a narušení zavařit.

EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Měření tepelného stavu prostředí bylo uskutečňováno v nízkoenergetickém domě firmy Instaplast v Zápech [3]. Jedná se o středně těžkou stav-

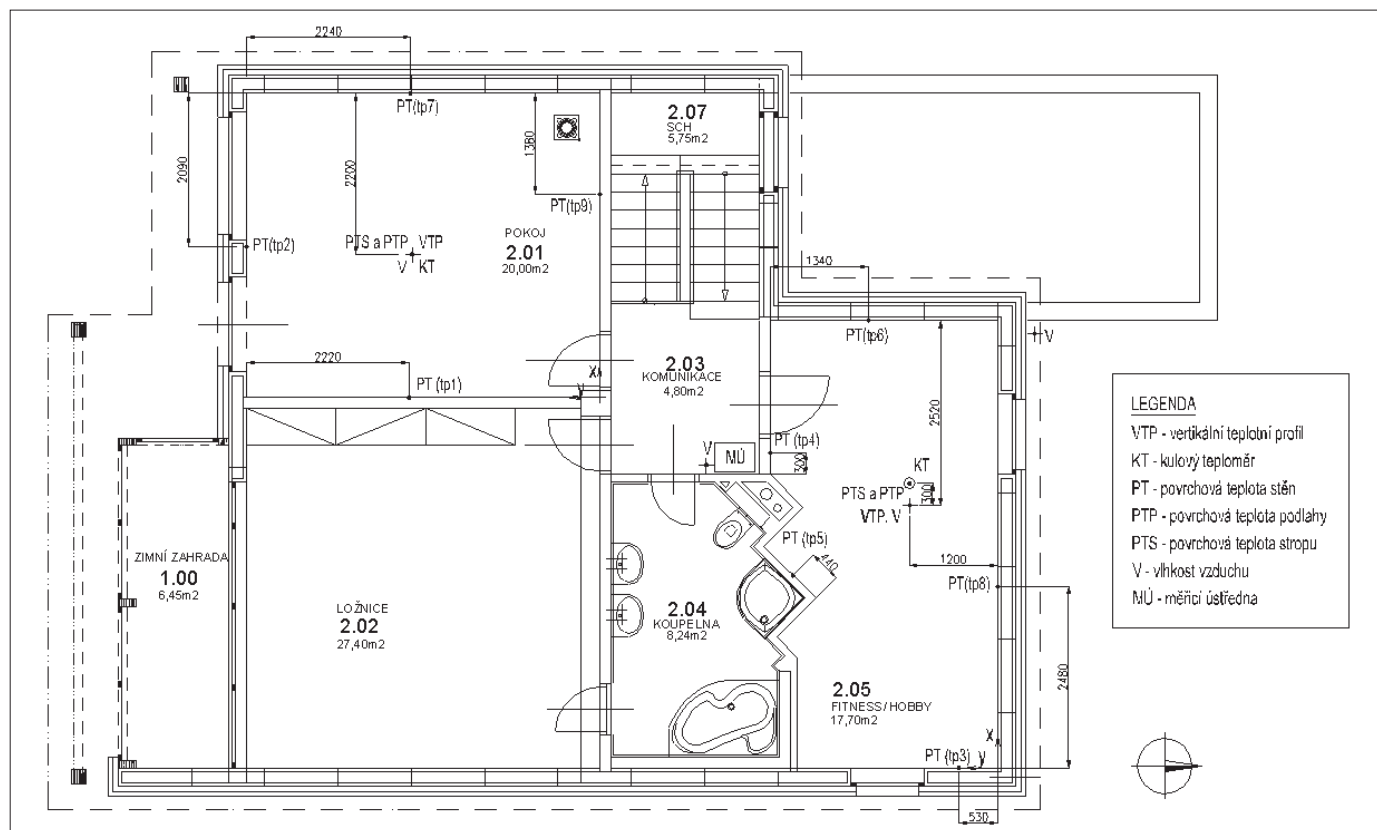


Obr. 3 Detail umístění kapilárních rohoží u rohu místnosti

bu, jejíž obvodové konstrukce jsou postaveny z termoizolačního stavebního systému. Tepelné technické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 2. Dům je vybaven sálavým systémem s kapilárními rohožemi, které jsou umístěny prakticky na všech stěnách objektu vč. podlahy a stropu (obr. 2). Velká teplosměnná plocha systému s kapilárními rohožemi společně s malou tepelnou ztrátou objektu (5,7 kW) umožňuje upravovat tepelný stav prostředí

Tab. 2 Součinitel prostupu tepla obvodových konstrukcí ve zkoumaném objektu

Konstrukce	U [W/(m ² .K)]
Obvodová stěna	0,20
Střecha	0,13
Podlaha 1. np	0,26
Podlaha 2. np	0,34



Obr. 4 Půdorysné schéma 2.np objektu vč. zakreslení měřených parametrů

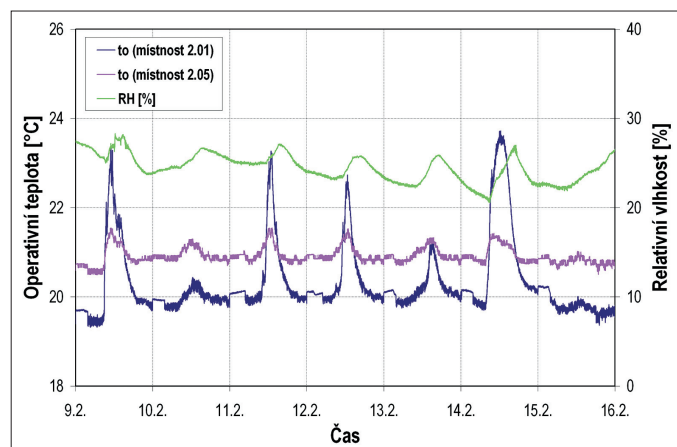
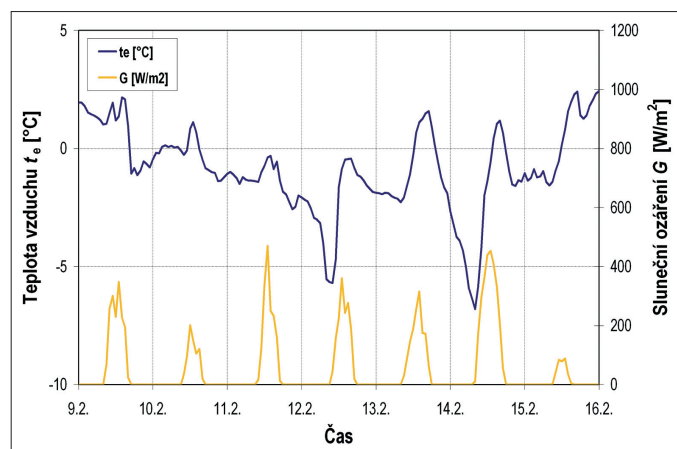
při střední teplotě teplosnosné látky blízké teplotě vzduchu v prostoru. Půdorysné schéma objektu je znázorněno na obr. 4. Větrání objektu zajišťují dvě rekuperační jednotky (v 1. np je jednotka s průtokem vzduchu 280 m³/h, v 2. np s průtokem 80 m³/h) s distribucí vzduchu talířovými ventily. V místnostech kde probíhalo měření byly talířové ventily přiškrceny. V době měření nebyly místnosti vybaveny žádným nábytkem; na oknech byly stahovací záclony.

V místnostech 2.01 (jižní orientace) a 2.05 (sever) bylo instalováno měřicí zařízení, monitorující tepelný stav prostředí. Přibližně uprostřed každé místnosti byly umístěny vícenásobné teplotní sondy pro měření vertikálních teplotních profilů. Pro tento účel byly použity speciální vícenásobné teplotní sondy s teplotními čidly Pt100 o minimálních rozměrech (1,6 × 3,2 × 1,0 mm), umístěnými na drátových stojanech. Na každém stojanu bylo umístěno celkem 10 čidel pro měření teploty vzduchu. S ohledem na možné osálení (zejména v místnosti 2.01) byla teplotní čidla opatřena stíněním [4]. Pro shromažďování dat byla použita měřicí ústředna typu Ahlborn ALMEMO 5590-3.

Společně s teplotou vzduchu byla měřena i výsledná teplota (kulový teploměr) a vlhkost vzduchu ve výšce 1,1 m nad podlahou. Během měření byly navíc monitorovány povrchové teploty okolních stěn, teplota chladicí resp. otopné vody a venkovní podmínky (teplota, vlhkost vzduchu a intenzita sluneční radiace). Schéma měření je znázorněno na obr. 4. Měření probíhala nepřetržitě v době od února do srpna 2006.

VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Na obr. 5 je znázorněn průběh venkovních klimatických podmínek (teplota venkovního vzduchu t_e a sluneční ozáření G) a operativní teploty ve sledo-



Obr. 5 Průběh venkovních klimatických podmínek a operativní teploty během vybraného týdne – vlevo zimní období

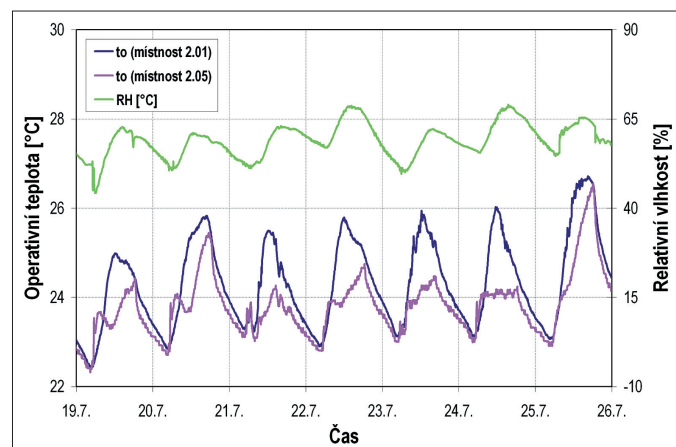
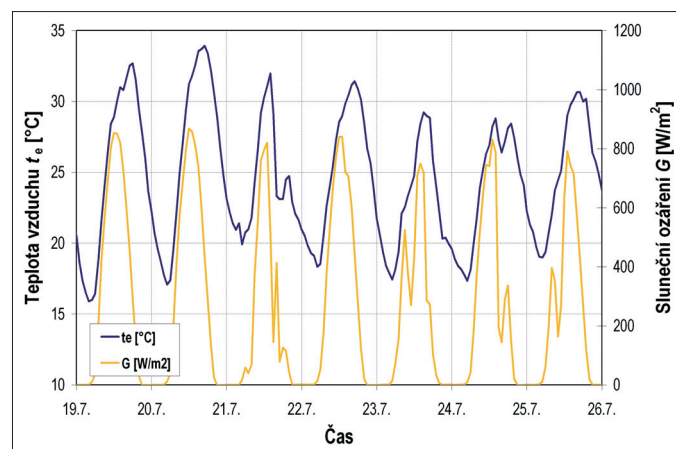
vaných prostorách během vybraného týdenního intervalu v zimním (obr. 5a) a v letním období (obr. 5b).

Podle údajů provozovatele je místnost 2.05 vytápěná na vyšší teplotu vzduchu (21 °C) než místnost 2.01 (20 °C), což potvrzuje i průběh operativní teploty na obrázku 5a. Zatímco v severně orientované místnosti (2.05) je operativní teplota prakticky ustálená, v místnosti orientované na jih je vidět kolísání operativní teploty během dne způsobené vlivem sluneční radiace. Obdobně vypadá situace i v letním období (obr. 5b), s tím, že operativní teplota dosahuje vyšších hodnot. Je však zřejmé, že i za extrémních klimatických podmínek (t_e , G), nepřesáhla operativní teplota v prostoru hodnotu 27 °C.

Vzhledem k tomu, že monitorování tepelného stavu prostředí bylo dlouhodobé, byly naměřené údaje vyhodnoceny statisticky. Výsledky měření v průběhu zkoumaných období (zima a léto) jsou shrnuty v tab. 3 a 4, které udávají četnost výskytu sledovaných teplot (v procentech) ve specifikovaném intervalu.

Operativní teplota byla vyhodnocena pro rychlost proudění $w < 0,2$ m/s, neboť v prostoru měření nebyl zdroj nuceného větrání. Střední teplota stěn představuje průměr naměřených povrchových teplot všech aktivních stěn (s kapilárním systémem). Vliv povrchové teploty transparentních ploch (oken) postihuje střední radiační teplota t_r vyhodnocená z výsledné teploty t_g . Teplota přírodní t_{w1} a vratné vody t_{w2} byla monitorována přímo za výměníkem tepla.

Z tab. 3 je zřejmé, že pro dosažení požadované teploty vzduchu (operativní teploty) v zimním období ve zkoumaném prostoru s kapilárními rohožemi bude teplota otopné vody blízká teplotě vzduchu, maximálně však 26 °C. To je vidět zejména z hodnot pro místnost 2.05 (severní orientace),



Obr. 5 Průběh venkovních klimatických podmínek a operativní teploty během vybraného týdne – vpravo letní období

Tab. 3 Procentuální časový výskyt intervalů teplot během zimního období (od 8. 2. do 5. 4. 2006)

Místnost	2.01 – pokoj					2.05 – fitness, hobby				
Od [°C]	19	21	23	25		18	20	22	24	
Do [°C]	19	21	23	25		18	20	22	24	
Operativní teplota	0	80,0	13,0	5,2	1,8	0	0,2	99,4	0,5	0
Teplota vzduchu	0	82,7	13,0	4,1	0,2	0	0,5	99,5	0	0
Střední teplota stěn	0	84,2	14,0	1,7	0	0,7	0,4	98,9	0	0
Teplota přívodní vody	0	0	31,8	66,1	2,0	0	0	22,0	38,9	39,0
Teplota vratné vody	0,1	1,8	97,4	0,7	0	0,1	0	98,3	1,6	0

kdy výskyt teploty vody (zpátečky) prakticky odpovídá výskytu teploty vzduchu a operativní teploty. Místnost 2.01 je výrazněji zatížena tepelnými zisky z venkovního prostředí než místnost 2.05, proto operativní teplota v ojedinělých případech přesahuje 25 °C.

V letním období (tab. 4) se již plně projevuje zatížení místnosti 2.01 z venkovního prostředí, kdy operativní teplota výjimečně přesahuje hodnotu 26 °C. Opět je ale zřejmé, že teplota chladicí vody je blízká teplotě vzduchu v místnosti, což znamená, že kapilární rohože mají rozhodující vliv na teplotní podmínky v prostoru.

Vertikální rozložení teplot vzduchu

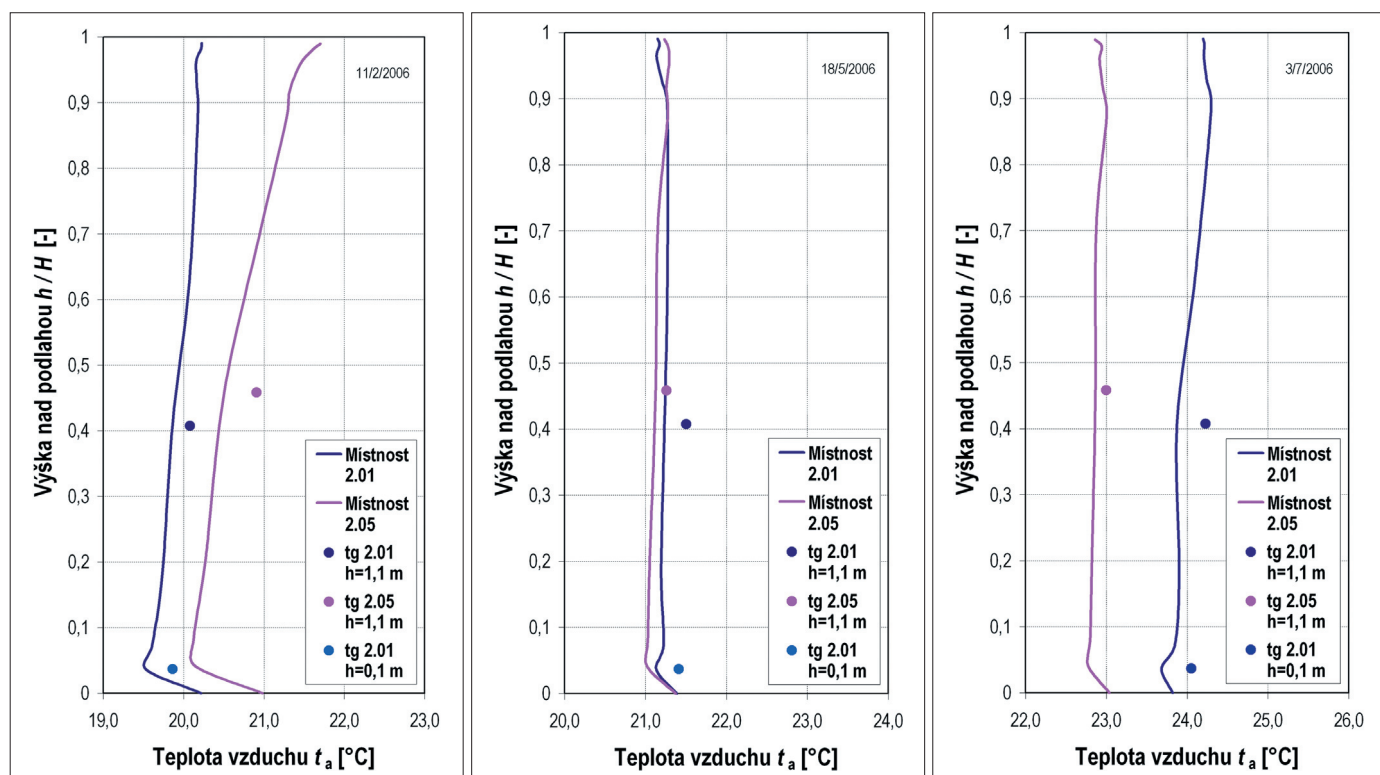
Na obrázku 6 jsou znázorněny vertikální teplotní profily ve zkoumaných místnostech s kapilárním systémem. Vzhledem k tomu, že obě místnosti měly odlišnou výšku stropu H (2,7 m – místnost 2.01 a 2,4 m – místnost 2.05), je osa y v grafech na obrázku 6 nakreslena jako bezrozměrná souřadnice výšky nad podlahou h . Teplotní profily reprezentují průměrné hodnoty naměřených teplot vzduchu uprostřed místnosti v ustáleném stavu. Společně s teplotními profily jsou na obr. 6 znázorněny naměřené teploty kulového teploměru.

Tab. 4 Procentuální časový výskyt intervalů teplot během letního období (od 12. 6. do 3. 8. 2006)

Místnost	2.01 – pokoj					2.05 – fitness, hobby				
Od [°C]	20	22	24	26		20	22	24	26	
Do [°C]	20	22	24	26		20	22	24	26	
Operativní teplota	0	12,7	50,5	34,4	2,4	0	10,5	56,0	32,3	1,2
Teplota vzduchu	0	13,8	54,4	29,8	1,9	0	10,7	58,7	29,7	0,9
Střední teplota stěn	0	14,8	59,1	24,9	1,2	0	12,0	63,9	23,8	0,3
Teplota přívodní vody	0	27,5	62,0	9,2	1,4	0	27,5	62,0	9,2	1,4
Teplota vratné vody	0,1	4,3	51,9	41,6	2,2	0,1	4,3	51,9	41,6	2,2

V tab. 5 jsou uvedeny podmínky měření pro vybrané vertikální teplotní profily. Průměrná denní teplota reprezentuje průměrnou teplotu venkovního vzduchu v době od 7.00 do 19.00 hodin. Průměrná povrchová teplota stěn zahrnuje teploty všech aktivních stěn s kapilárním systémem v dané místnosti během ustáleného stavu (nezahrnuje povrchovou teplotu oken). Průměrná teplota vody je hodnota vyhodnocená za 24 hodin.

Teplotní profily ukazují téměř vyrovnané vertikální rozložení teplot vzduchu pro všechna zkoumaná roční období. Jak již bylo uvedeno, místnost 2.05 je vytápěna na vyšší teplotu, než místnost 2.01 což je patrné i z obrázku 6a. Tento fakt je zřejmý i z tabulky 4, kde je vidět, že průměrná teplota stěn s kapilárními rohožemi v místnosti 2.01 je cca o 1 K nižší než v místnosti 2.05. V zimním období je možné sledovat mírný sklon teplotních profilů, což je zapříčiněno rozvodem otopné vody v obvodových stěnách, který je realizován shora dolů. Na obrázku 6 jsou rovněž znázorněny výsledné teploty měřené kulovým teploměrem t_g ve výšce 0,1 m (místnost 2.01) a 1,1 m (místnost 2.01 a 2.05) nad podlahou. Je vidět, že výsledná teplota je vyšší, než teplota vzduchu v prostoru a odpovídá střední povrchové teplotě stěn (tab. 5). Vliv chladného povrchu okna se v měřené poloze prakticky neprojevuje ani v jedné z obou zkoumaných místností.



Obr. 6 Vertikální teplotní profil a výsledná teplota v místnosti s kapilárními rohožemi – a) zimní den, b) jarní den, c) letní den

Tab. 5 Podmínky měření pro vybrané dny

	Datum	Průměrná denní teplota vzduchu	Průměrná teplota přírodní vody	Průměrná teplota vratné vody	Průměrná povrchová teplota stěn (2.01)	Průměrná povrchová teplota stěn (2.05)
		t_a [°C]	t_{w1} [°C]	t_{w2} [°C]	t_{p1} [°C]	t_{p2} [°C]
Zimní den	11/2	0,8	23,8	21,5	20,2	21,3
Jarní den	18/5	16,4	21,2	21,3	20,9	20,9
Letní den	3/7	22,0	21,7	22,7	23,4	22,7

V jarním období (obr. 6b) jsou vertikální teplotní profily v obou místnostech vyrovnané a prakticky totožné. Průměrné teploty povrchových stěn jsou pro obě místnosti shodné a rovněž teplota přírodní a vratné vody vykazují velmi malý rozdíl (tab. 5). V tuto dobu již místnosti nejsou vytápěny, pouze příležitostně chlazeny. Výsledná teplota v místnosti 2.01 je nepatrně vyšší než teplota vzduchu v místnosti, což způsobuje vyšší povrchová teplota okolních stěn.

Typický vertikální teplotní profil pro letní období je znázorněn na obr. 6c. Opětovně se zde projevují vyrovnané teplotní profily. Místnost 2.01 je více vystavena tepelné zátěži z venkovního prostředí (sluneční radiace) než místnost 2.05, proto se vyznačuje vyšší teplotou vzduchu (24 °C). Jak ukazuje tab. 5 i povrchová teplota stěn je poněkud vyšší než v místnosti 2.05. To je dáno účinkem slunečního záření, což má za následek i zvýšenou výslednou teplotu.

V místnosti se severní orientací (2.05), která není během dne ovlivněna přímým slunečním zářením je povrchová teplota stěn téměř totožná (v rámci chyby měření) s teplotou vratné vody (tab. 5) a málo se odlišují od teploty vzduchu (obr. 6c). Výsledná teplota v místnosti 2.05 se v rámci chyby měření velmi málo liší od teploty vzduchu v místnosti (+ 0,1 K).

ZÁVĚR

Naměřené vertikální rozložení teplot vzduchu v prostoru s kapilárními rohožemi vykazuje během celého roku prakticky optimální teplotní profil v místnosti, což způsobuje velká teplosměnná plocha systému. V době měření navíc nebyl v prostorách umístěn žádný nábytek, což výsledky měření poněkud idealizuje. Rozlehlá teplosměnná plocha systému s kapilárními rohožemi společně s nízkou tepelnou ztrátou objektu umožňuje upravovat tepelný stav prostředí při střední teplotě teplosměnné látky blízké teplotě vzduchu v prostoru. V případě obvyklého rozmístění vnitřního zařízení bytu (skříně) bude teplota teplosměnné látky pro vytápění poněkud vyšší, naopak při režimu chlazení nižší.

Zmíněný fakt umožňuje využití nízkoenergetických zdrojů tepla, či alternativních zdrojů energie, jakými jsou především solární soustavy a soustavy s tepelným čerpadlem vzduch – voda, voda – voda (využití nízkoenergetického tepla z vodních toků, podzemní voda) a země – voda (využívání tepla ze zemského polomasivu – zemní vrty, plošné zemní výměníky) s vysokým topným faktorem pro vytápění a chladicím faktorem pro chlazení. Využití kapilárních systémů ve spojení s alternativními, nebo nízkoenergetickými zdroji tepla vede k udržení optimálního tepelného stavu prostředí.

Příspěvek byl napsán s podporou výzkumného záměru MSM 6840770011 Technika životního prostředí.

Kontakt na autora: Vladimír Zmrhal@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] *ASHRAE Handbook 1996 Systems and Equipment*. 1996, Atlanta: ASHRAE. ISBN – 1-883413-35-4
- [2] Instaplast Praha a.s., *Domovská stránka Instaplast AISEO systém*, aktualizováno 15.1.2006. Dostupné z: <<http://www.aiseo.cz>>
- [3] Instaplast Praha a.s., *Stránka firmy Instaplast – NERD*, aktualizováno 19.9.2006. Dostupné z: <<http://www.nedum.cz>>.
- [4] ZMRHAL V. *Tepelný komfort a energetická bilance systému s chladicím strojem*. 2005, Doktorská disertační práce, ČVUT v Praze. ■