

STROPNÍ CHLAZENÍ – MĚŘENÍ A CFD SIMULACE

Ing. Martin Kny, Ph.D.

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze

Recenzent

doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.

Příspěvek se věnuje chladicím stropům pro vytápění a chlazení objektů. Vlastností těchto systémů je jejich relativně nízký chladicí výkon s ohledem na riziko kondenzace. Chladicí výkon lze u velkoplošných chladicích stropů zvýšit částečným vynecháním podhledu (otevřením dutiny) nebo úplnou změnou geometrie (otevřené lamelové chladicí stropy). Vlivu geometrie chladicího stropu na jeho výkon se věnuje tento příspěvek. Výkony pro jednotlivá geometrická uspořádání jsou hodnocena s využitím CFD simulací. Simulace jsou doplněny o měření ve zkušební komoře laboratoří univerzitního centra ČVUT UCEEB s různým uspořádáním chladicích stropů. Výsledky z měření a simulací jsou vzájemně porovnány.

Klíčová slova: chladicí stropy, CFD simulace, chladicí výkon

CHILLED CEILINGS - MEASUREMENT AND CFD SIMULATION

This paper focuses on active ceiling soffits which provide heating and cooling especially in office buildings. A particular disadvantage of these systems is their low performance, when they work in cooling mode. The cooling capacity can be increased by partially cutting the soffit or by completely changing the geometry (ceiling baffles). This paper is dedicated to the suspended ceiling geometry effect on its cooling performance. Cooling performance of individual geometric arrangements is evaluated using CFD simulations. These simulations are also complemented by measurements on a real soffit installed in the laboratory of the university's research centre (UCEEB) in its climate chamber.

Keywords: chilled ceilings, CFD simulation, cooling capacity

ÚVOD

Stropní chlazení a vytápění se uplatňuje převážně v administrativních budovách, okrajově i v objektech bytových. Oproti systémům, kdy je teplo sdíleno převážně konvekcí (např. indukční jednotky, ventilátorové konvektory) jsou tyto systémy bezhlučné, neobtěžují průvanem a obsluhované interiéry vykazují lepší parametry tepelného komfortu. Nevýhodou těchto systémů je riziko povrchové kondenzace a s tím spojený relativně nízký chladicí výkon.

Možnosti zvýšení chladicího výkonu u chladicích stropů úpravou jejich geometrie se věnuje tento příspěvek. Z hlediska chladicího výkonu je hodnoceno 5 variant pohledu z horizontálních desek a 3 varianty pohledu lamelového (vertikální desky).

METODIKA STANOVENÍ CHLADICÍHO VÝKONU

Pro hodnocení vlivu geometrie na chladicí výkon bylo využito měření a počítačové simulace mechaniky tekutin CFD. Měření bylo provedeno v měřící komoře univerzitního centra UCEEB ČVUT v Praze. Celkem bylo provedeno měření 2 geometrických variant chladicího stropu (M1 a M2 viz obr. 2).

Simulace byla provedena pomocí programu ANSYS Fluent [1] ve kterém byla modelována měřící komora a vyhodnoceno celkem 8 variant uspořádání chladicího stropu. Z toho 5 variant tvořil strop sestavený z horizontálních panelů (2 varianty M1 a M2 byly totožné s měřením). Další 3 varianty představovaly otevřený chladicí strop sestavený z vertikálních lamel. Hodnoceným parametrem byl chladicí výkon stropu.

Měření výkonu

Měření chladicího výkonu bylo provedeno dle normy ČSN EN 14240 [2] v měřící komoře. Jedná se o dvě spolu sousedící místnosti umístěné v prostoru s řízeným prostředím viz obr. 1.

Měřící komora je připojena na rozvod otopné a chladicí vody (měřen průtok a teploty vody). V komoře jsou měřeny parametry vnitřního prostředí (teplota vzduchu ve 3 výškových úrovních, teplota kulového teploměru, povrchové teploty stěn, podlahy a stropu). Měřena je také teplota vzduchu v meziprostoru. Konstrukce montovaného podhledu je směrem z interiéru následující:

- sádrokartonová deska o šířce 300 mm a tloušťce 12,5 mm - jedná se o akustickou desku s děrováním (neprochází skrz); desky byly osazeny na nosníky (rošt) zavěšené pod stropem kabiny,
- rohož Aquatherm (materiál PP, rozměry 4250 x 280 mm, 7 potrubí s čtvercovým profilem 12 x 12 mm a tloušťkou stěny 1,7 mm),
- volný technologický prostor (cca 150 mm).

Měření výkonu bylo realizováno pro 2 varianty stropu. V první variantě (M1) byl podhled celoplošný (10 panelů na šířku komory). Ve variantě druhé (M2) byly 4 panely vynechány a bylo tak umožněno pronikání vzduchu až ke stropní konstrukci (viz obr. 2).

Principem měření chladicího výkonu bylo dosažení ustáleného stavu prostředí v komoře při současné dodávce tepla do komory a jeho odvádění chlazeným stropem. Měření probíhalo při teplotě v komoře a v meziprostoru cca 26 °C. Jako vnitřní zdroje tepla byly využity žárovky umístěné v plechových válcích, viz obr. 4. Chladicí výkon stopu Q_{ch} [W] byl vypočten z průtoku a rozdílu teplot chladicí vody dle (1):

$$Q_{ch} = m \cdot c (t_{w1} - t_{w2}) \quad [W] \quad (1)$$

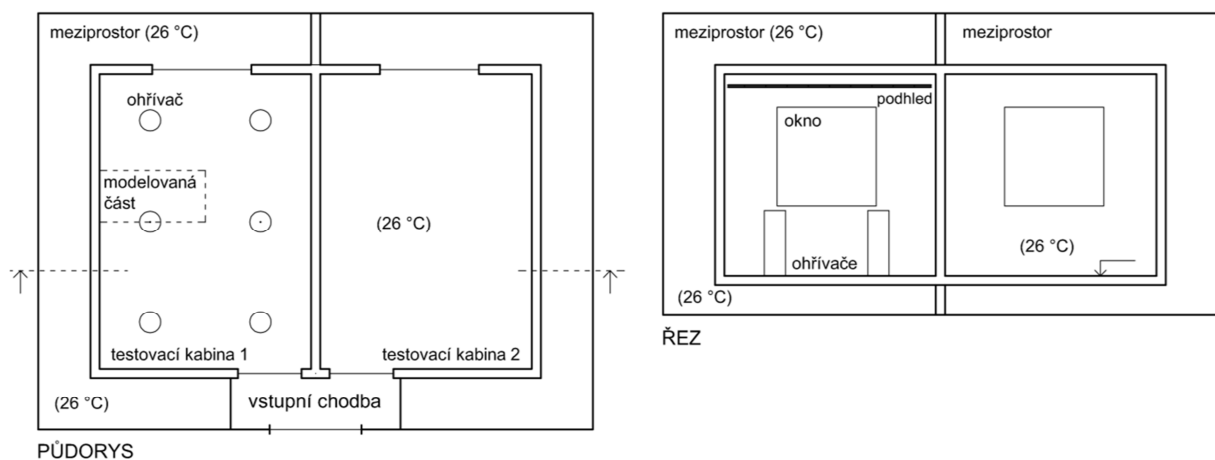
Kde c je měrná tepelná kapacita [J/(kg·K)]

m hmotnostní průtok [kg/s]

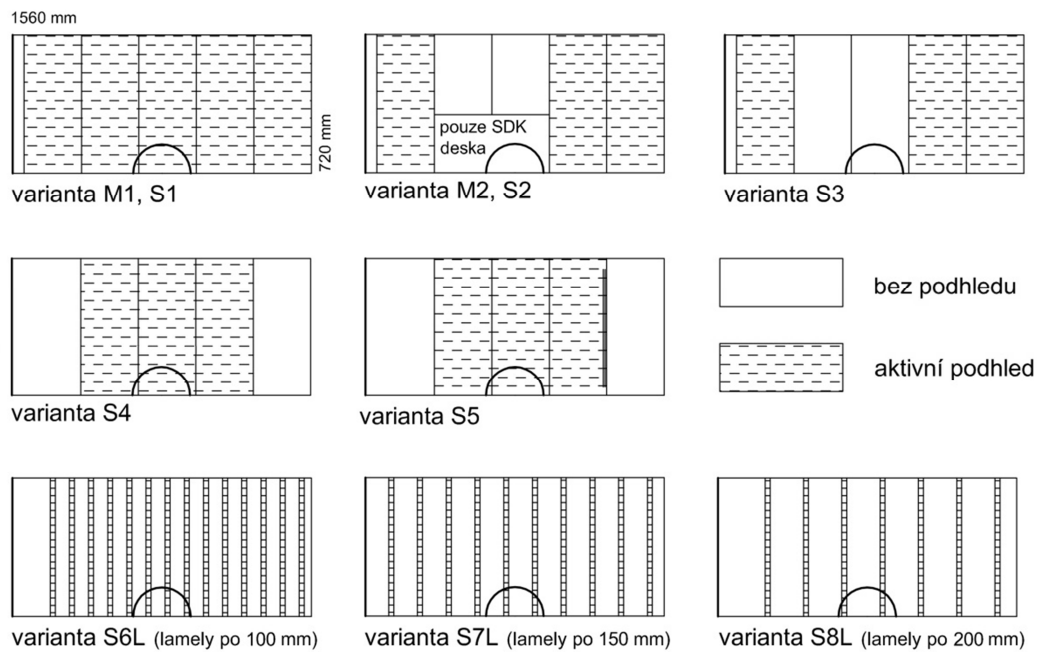
t_{w1} teplota vratné vody [°C]

t_{w2} teplota přívodní vody [°C]

Pro srovnání jednotlivých variant bylo provedeno hodnocení dle jmenovitého chladicího výkonu Q_n [W/m²] vztaženého na m² aktivní plochy chladicího stropu. Aktivní plochou se dle normy rozumí půdorysná plocha vymezená průmětem obvodu chladicího stropu. Jmenovitý výkon byl vyčíslen pro teplotní rozdíl $\Delta t = 8$ K (rozdíl mezi střední teplotou chladicí vody a výslednou teplotou měřenou kulovým teploměrem). Z provedeného měření byl zjištěn jmenovitý chladicí výkon $Q_n = 46,9$ W/m² pro variantu s celoplošným chladicím stropem M1 (10 desek) a $Q_n = 67,7$ W/m² pro variantu M2, kde byly 4 desky vynechány (40 % plochy).



Obr. 1 Půdorys a řez měřicí komorou. Modelována byla pouze vyznačená část komory



Obr. 2 Výřezy kabiny použité pro simulaci. Varanty M1 a M2 představují měření, S1 až S8L simulaci.



Obr. 3 Skladba použitého stropu (SDK deska + plastová rohož chladicího stropu)



Obr. 4 Pohled do komory při měření chladicího výkonu (varianta M1).

CFD simulace

V rámci simulace zpracované v programu ANSYS Fluent bylo realizováno vyhodnocení 8 variant pohledů (viz Obr. 2). Varianty S1 a S2 odpovídaly geometricky stropům změřeným v měřicí komoře (M1 a M2). Varianta S1 reprezentuje celoplošný uzavřený chladicí strop s aktivní plochou 11,9 m². Aktivní plocha pro varianty S2 až S5 byla vždy 7,14 m². Varianty S6L až S8L tvořily vertikálně zavěšené lamely s výškou 200 mm a rozestupy 100, 150 a 200 mm. Lamely byly tvořeny SDK deskou o tl. 30 mm s integrovanou plastovou rohoží (geometrie rohože obdobná jako v předchozích variantách).

Okrajové podmínky byly ve všech simulacích totožné. Teplota v meziprostoru komory dosahovala 26 °C a střední teplota chladicí kapaliny 18 °C. Emisivita povrchu zdrojů tepla byla uvažována hodnotou 0,18 (nelakovaný plech), ostatní povrchy emisivita 0,94. Součinitel prostupu tepla potrubí byl 100 W/m²K směrem do vzduchu (přestup tepla voda – plast + prostup tepla plast) a 150 W/m²K směrem do sádrokartonu.

Vzhledem ke geometrii měřicí komory a rovnoměrnému rozmístění zdrojů tepla bylo při tvorbě modelu využito symetrie. Modelován byl pouze výsek komory, konkrétně její 1/12 o půdorysné ploše 1560 x 720 mm a výšce 2850 mm (viz obr. 1 a obr. 2).

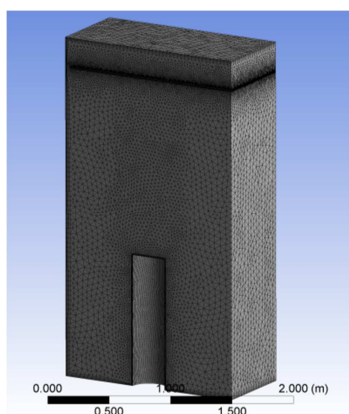
Použitá zjednodušení modelu:

- nebyla modelována kotevní konstrukce stopu,
- nebylo modelováno připojovací potrubí jednotlivých rohoží,
- nebylo modelováno vlastní potrubí, tepelný tok stěnou potrubím byl nahrazen okrajovou podmínkou,
- byly zanedbány akustické otvory v SDK deskách (otvory neprocházely skrz desku),
- byla uvažována konstantní teplota chladicí vody (18 °C), bez ohledu na předávaný výkon,
- obvodové konstrukce komory nebyly modelovány (nahrazeny okrajovou podmínkou).

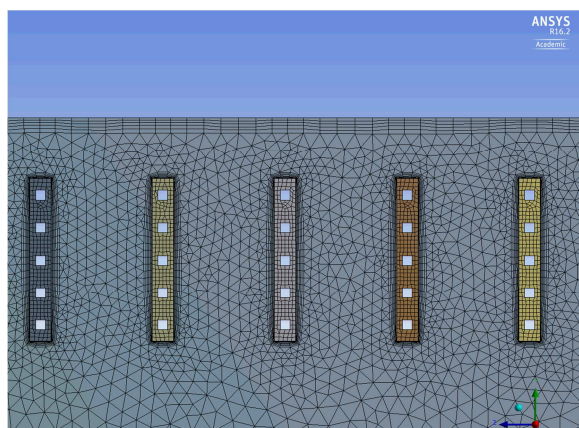
Parametry a nastavení modelu v programu ANSYS Fluent:

- počet tetrahedron buněk (obr. 5) dosahoval v jednotlivých variantách 2,2 až 3,1 mil. , výsledné y^+ do 2 pro 99 % buněk,
- model turbulence k- ϵ Realizable ve standardním nastavení, Full Buoyancy Effect,
- Enhanced Wall Treatment,
- objemová roztažnost vzduchu započtena volbou Boussinesq approximation,
- viskozita a tepelná kapacita vzduchu byla uvažována jako Piecewise-Linear,
- výpočet byl proveden jako nestacionární (ukončen v okamžiku ustálení energetické bilance v modelu), výpočtový krok max. 1 s,
- radiace byla započtena pomocí DO modelu.

Pro výpočet jmenovitého chladicího výkonu Q_n [W/m²] bylo třeba v jednotlivých modelech stanovit výslednou teplotu. Ta byla určena jako průměr střední radiační teploty a teploty vzduchu v pozici kulového teploměru [3].



Obr. 5 Výpočtová síť pro variantu S1 (rozměry 1,56 m x 0,72 m x 2,85 m)



Obr. 6 Detailní pohled na výpočtovou síť pro variantu S7L (řez pod stropem)

VÝSLEDKY

Výsledky z provedených měření a simulací jsou shrnuty v tab. 1 a 2 a na obr. 7.

Pro varianty podhledu z horizontálních desek dosahovalo největšího jmenovitého výkonu Q_n provedení stropu S3 s hodnotou 70,9 W/m². Naopak nejnižší výkon 43,6 W/m² byl zjištěn u varianty S1. Varianty s částečně vynechaným podhledem (S2 až S5) vykazovaly o cca 55 % vyšší jmenovitý výkon než varianta (S1) s celoplošným uzavřeným podhledem. Rozložení teplot pro vybrané varianty je patrné z obr. 8 až obr. 10. Na obr. 8 je znázorněno vektorové pole rychlostí. Rychlosti nad ohřívačem dosahují maxima cca 0,38 m/s. Ve výšce 1.1 m se rychlosti (mimo ohřívačů) pohybují okolo 0,05 m/s.

Při porovnání výsledků z měření a simulace je zřejmé, že bylo dosaženo poměrně dobré shody. Nominální chladičí výkon Q_n zjištěný simulací je u varianty S1 o 7 % nižší než změřený, u varianty S2 je výkon o cca 3 % vyšší.

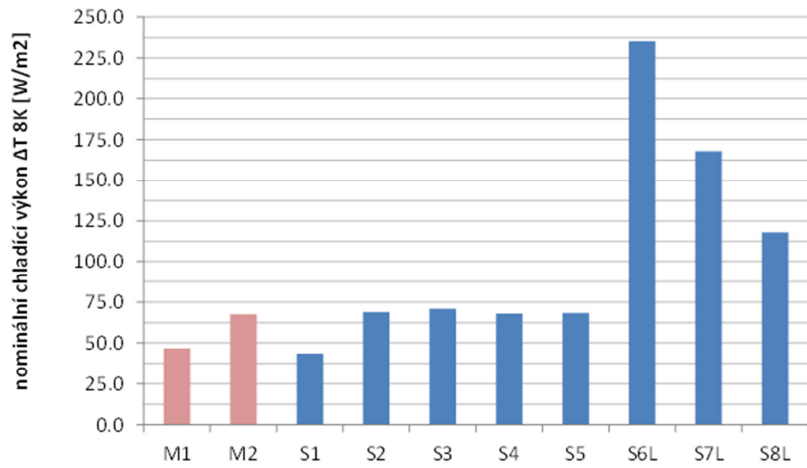
U lamelového otevřeného stropu byly zjištěny mnohem vyšší chladicí výkony. Jmenovité výkony Q_n zde dosahovaly 118 až 235 W/m², byly tak až 5 x vyšší oproti celoplošnému uzavřenému stropu (varianta S1). Vzhledem k vyšším výkonům zdrojů tepla bylo v důsledku dosahováno u otevřených lamelových stropů i vyšších rychlostí proudění vzduchu v komoře (pro variantu S6L až 0,72 m/s).

Tab. 1 Porovnání výsledků z měření a simulací – souhrn měření CFD simulace

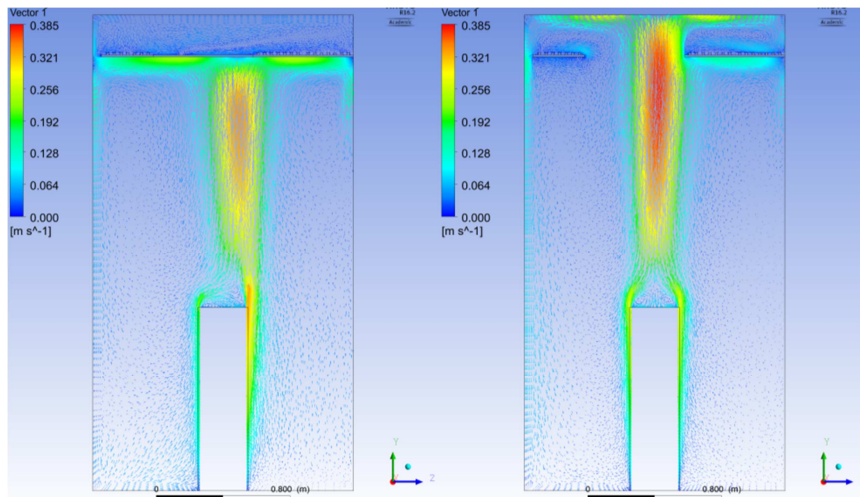
	měření		CFD simulace							
	M1	M2	S1	S2	S3	S4	S5	S6L	S7L	S8L
Teplota vzduchu [°C]	26,7	26,6	26,9	26,6	26,4	26,9	26,7	25,2	25,8	25,8
Střední radiační teplota [°C]	-	-	25,4	26,6	26,4	26,6	26,7	26,50	26,2	25,8
Výsledná teplota [°C]	26,9	26,3	26,2	26,6	26,4	26,7	26,7	25,85	26,0	25,8
Střední teplota chladicí vody [°C]	18,8	16,6	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Chladicí výkon [W]	562	583	530	530	530	530	530	2702	1962	1293
Aktivní chladicí plocha [m ²]	11,9	7,1	11,9	7,1	7,1	7,1	7,1	11,7	11,7	11,2
Teplotní rozdíl ΔT [K]	8,07	9,66	8,17	8,61	8,37	8,75	8,68	7,85	7,98	7,82
Měrný chladicí výkon [W/m ²]	47,2	81,7	44,5	74,2	74,2	74,2	74,2	231,0	167,7	115,4
Jmenovitý chladicí výkon ΔT 8K [W/m ²]	46,8	67,7	43,6	69,0	70,9	67,9	68,4	235,4	168,1	118,1
Jmenovitý chladicí výkon ΔT 8K [%]	100	144,4	93,1	147,3	151,4	145,0	146,0	502,4	358,8	252,1

Tab. 2 Porovnání výsledků z měření a simulací – chladicí výkony v závislosti na délce potrubí

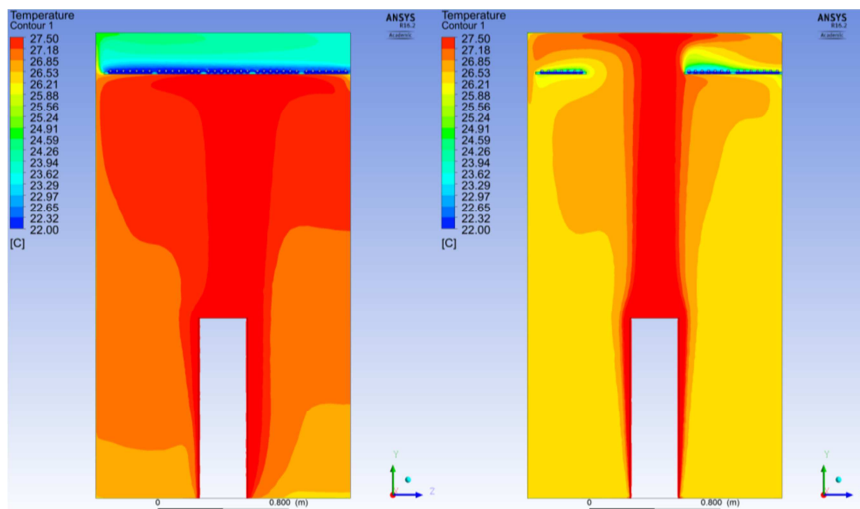
	měření		CFD simulace							
	M1	M2	S1	S2	S3	S4	S5	S6L	S7L	S8L
Jmenovitý chladicí výkon [W] pro $\Delta t = 8K$	557	483	519	493	507	485	488	2754	1967	1323
Celková délka potrubí [m]	302,4	181,4	302,4	181,4	181,4	181,4	181,4	645	430	301
Chladicí výkon potrubí [W/m] $\Delta t = 8K$	1,84	2,66	1,72	2,71	2,79	2,67	2,69	4,27	4,57	4,39



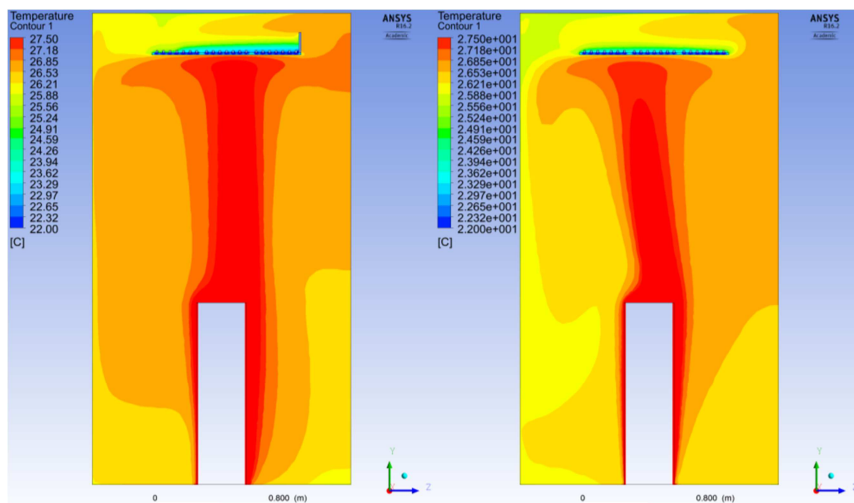
Obr. 7 Grafické porovnání chladičících výkonů hodnocených variant (červeně - měření)



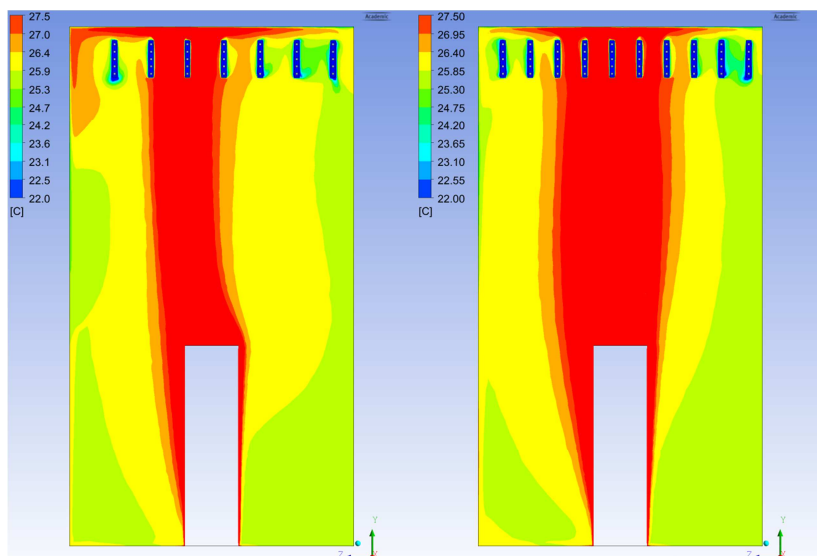
Obr. 8 Rychlostní pole pro varianty S1 (vlevo) a S3 (vpravo)



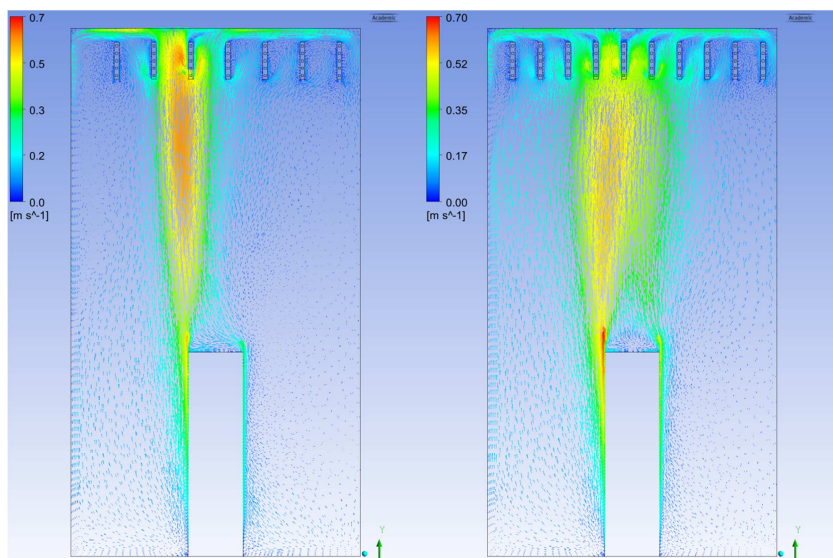
Obr. 9 Teplotní pole pro varianty S1 (vlevo) a S3 (vpravo)



Obr. 10 Teplotní pole pro variantu S5 se zástěnou (vlevo) a S4 (vpravo)



Obr. 11 Teplotní pole pro variantu S8L se zástěnou (vlevo) a S7L (vpravo)



Obr. 12 Rychlostní pole pro variantu S8L (vlevo) a S7L (vpravo)

DISKUSE

Výsledky ze simulace vykazují oproti měření pouze malé odchylky. Jmenovitý chladicí výkon zjištěný simulací je u varianty s celoplošným uzavřeným stropem (S1) o 7 % nižší než změřený, u varianty S2 je výkon o cca 3 % vyšší. Odchylky lze přisuzovat zjednodušením modelu a určitou nejistotou vstupních dat (součinitel přestupu tepla mezi potrubím a SDK deskou, reálná tepelná vodivost SDK desky). Na výsledky může mít dále vliv geometrické zjednodušení zdrojů tepla, které byly modelovány pouze jako válce. Reálné ohříváče tvoří duté plechové válce, ve kterých tvoří zdroj tepla žárovky. Teplý vzduch může z válců unikat otvory v jejich horní části. Charaktery konvektivních proudů nad zdroji tepla i jejich povrchové teploty tak budou oproti simulaci odlišné.

Z dalších simulovaných variant (S3 až S5) je zřejmé, že nejvyššího chladicího výkonu je dosahováno, pokud jsou vynechaná místa v podhledu situována nad zdroji tepla (až 71 W/m²). Naopak jakékoli překážky umístěné ve stropním meziprostoru chladicí výkon omezují (S4). Celkově jsou však odchylky chladicích výkonů jednotlivých variant s částečně vynechaným podhledem malé (cca do 5 %). Pro zvýšení chladicího výkonu je třeba v co největší míře umožnit proudění vzduchu ke stropní konstrukci, zvýšit konvektivní složku přenosu tepla a v maximální míře využít zvýšenou teplosměnnou plochu.

Varianty s otevřeným lamelovým chladicím stropem dosahovaly výrazně vyšších jmenovitých chladicích výkonů (118 až 235 W/m²), jsou tak cca 4 x vyšší oproti ostatním hodnoceným variantám. Tento stav je dán zejména způsobem určení aktivní plochy. Ta je v normě stanovena jako půdorysný průmět obvodu chlazené části stropu. Skutečná teplosměnná plocha je však u těchto provedení chladicího stropu výrazně větší. Při porovnání měrného chladicího výkonu na 1 m potrubí je již výkon pouze cca 2 x vyšší, lamely 4,2 W/m až 4,6 W/m, horizontální desky 1,7 W/m až 2,8 W/m (viz tab. 2). Další příčinou pro zjištěný vysoký výkon těchto stropů je dán poměrně vysokou rychlostí proudění okolo lamel (až 0,5 m/s). Takto vysoké rychlosti nelze v interiéru budov, kde neslouží k ohřevu ohříváče použité v simulaci, očekávat.

Otevřené chladicí stropy (lamelové, nebo s částečným vynecháním podhledu) dosahují vyšších chladicích výkonů než stropy uzavřené a činí je to v tomto ohledu výhodnější. Otevřených chladicích stropů (podhledů) je vhodné využít u objektů s těžkými železobetonovými stropy, umožní se tak využít jejich tepelně akumuláčních schopností a v důsledku dojde ke snížení špičkových chladicích výkonů.

Negativním jevem u otevřených chladicích stropů (s částečným vynecháním podhledu) je riziko kondenzace na potrubí s chladicí vodou, ke kterému může pronikat teplý a vlhký vzduch z místnosti. U podhledů s uzavřenou dutinou jsou podmínky ve stropním meziprostoru stabilnější a umožňují krátkodobě provoz s nižší teplotou chladicí vody [4].

ZÁVĚR

Z provedených měření a simulací je zřejmé, že chladicí stropy s částečným vynecháním podhledu vykazují vyšší jmenovité chladicí výkony [W/m²] (pro posuzované varianty až o cca 55 %) než podhledy celoplošné. Pro zvýšení chladicího výkonu je třeba v co největší míře umožnit proudění

vzduchu mezi podhledem a stropní konstrukcí. Nejvyšších chladicích výkonů je dosahováno, pokud jsou otvory v podhledu umístěny nad zdroji tepla.

Nejvyšších jmenovitých chladicích výkonů dosahují otevřené chladicí stropy z vertikálních lamel (2 až 4 x vyšší oproti podhledům horizontálním). To je dáno zejména větší teplosměnnou plochou u lamelových provedení.

Kontakt na autora: martin.kny@cvut.cz

Tento článek vznikl za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I č. LO1605 - Univerzitní centrum energeticky efektivních budov – Fáze udržitelnosti.

Použité zdroje

- [1] ANSYS Inc. ANSYS FLUENT Theory Guide: ANSYS Help System: v16.02 [software]. Canonsburg, USA.
- [2] ČSN EN 14240. Větrání budov – Chladicí kryty – Zkoušení a hodnocení. ČNI, 2004.
- [3] ČSN EN ISO 7730. Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu. ČNI, 2006.
- [4] KNY, M., ADAMOVSKEÝ, D. Ověření podmínek kondenzace vzdušné vlhkosti na chladicích stropěch. Výzkumná zpráva. 2017.
- [5] ZMRHAL, V. Otevřené – konvektivní chladicí stropy. Vytápění, větrání, instalace. 2009, roč. 18, č. 3, s. 118–121.
- [6] ZMRHAL, V. Zkoušení a dimenzování chladicích stropů. Vytápění, větrání, instalace. 2007, roč. 16, č. 2, s. 75–80.