

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

HYDRAULIKA DESKOVÝCH OTOPNÝCH TĚLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Souhrn

Diplomová práce se věnuje otopným tělesům se sériovým zatékáním do jednotlivých desek a tělesům s jiným, než paralelním zatékáním. Diplomová práce zahrnuje laboratorní měření dvou otopných těles, jedno s čistě sériovým zatékáním a druhé s řízeným zatékáním. Výsledky měření jsou pak srovnávány s údaji od výrobců. Dále jsou naměřená data z laboratorního měření použita jako vstup do matematické simulace v programu Fluent. Na základě získaných tepelně-technických vlastností a počítačové simulace je posouzen vliv těchto těles na možné energetické úspory v rámci jejich provozu a na střední radiační teplotu ovlivňující výslednou teplotu ve vytápěném prostoru.

Summary

This master's thesis deals about radiators with serial connected panels and radiators with other than parallel connected panels. This thesis involves laboratory measurement of two different radiators. The first radiator has clearly serial connected panels and the other one radiator with a controlled flow. The measurement results are compared with data from the manufactures. Furthermore, the measured data from experiment are used as input into the Fluent mathematical simulation. Based on the thermal-technical properties and computer simulation assesses the impact of these radiators on the potential energy savings associated with their operation and their effect on mean radiant temperature.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Hydraulika deskových otopných těles“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Jiřího Bašty, Ph.D., s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 29. 6. 2015

Tomáš Makal

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jiřímu Baštovi, Ph.D. za jeho cenné rady a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Romanu Vavříčkovi, Ph.D. za vstřícnost a pomoc při měření v laboratořích.

Obsah

1.	Úvod.....	- 10 -
1.1.	Cíle diplomové práce.....	- 10 -
2.	Teoretická část	- 11 -
2.1.	Požadavky na energeticky úsporná otopná tělesa	- 11 -
2.2.	Analýza rozličných řešení	- 12 -
3.	Laboratorní měření.....	- 14 -
3.1.	Cíl měření	- 14 -
3.2.	Měřicí trať a zařízení	- 14 -
3.3.	Výsledky měření.....	- 16 -
3.3.1.	Měření v ustáleném stavu.....	- 16 -
3.3.2.	Měření náběhu otopných těles.....	- 22 -
3.4.	Závěr laboratorního měření	- 27 -
4.	Počítačová simulace	- 29 -
4.1.	Modelování.....	- 29 -
4.2.	Nastavení simulace	- 30 -
4.3.	Okrajové podmínky	- 31 -
4.4.	Výsledky simulace.....	- 33 -
5.	Závěr	- 40 -
6.	Seznam použité literatury.....	- 42 -

Soupis použitého značení

Značka	Veličina	Jednotka
c	měrná tepelná kapacita	J/kgK
g	gravitační zrychlení	m/s ²
K_o	podíl tepla předaného konvekcí	%
l	výška tělesa	m
\dot{Q}	výkon tělesa	W
\dot{Q}_c	výkon tělesa předaný konvekcí	W
\dot{Q}_r	výkon tělesa předaný sáláním	W
R_{si}	odpor při přestupu tepla na vnitřní stěně	m ² K/W
R_{se}	odpor při přestupu tepla na vnější stěně	m ² K/W
Ra	Rayleighovo číslo	-
S	povrch tělesa	m ²
S_a	podíl tepla předaného sáláním	%
t_1	teplota vody na přívodu	°C
t_2	teplota vody na zpátečce	°C
t_a	teplota stíněného teploměru	°C
t_e	venkovní výpočtová teplota	°C
t_g	výsledná teplota	°C
t_m	střední teplota	°C
t_s	střední povrchová teplota	°C
T_m	střední termodynamická teplota	K
T_r	střední radiační teplota	K
T_s	střední termodynamická teplota povrchu	K
U	součinitel prostupu tepla	W/m ² K
\dot{V}	objemový průtok	m ³ /s

α	teplotní vodivost	m^2/s
$\alpha_{c,g}$	součinitel přestupu tepla kulového teploměru	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
β	součinitel objemové roztažnosti	$1/\text{K}$
ΔT	rozdíl teplota	K
ε	emisivita	-
λ	tepelná vodivost	W/mK
μ	dynamická viskozita	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
ν	kinematická viskozita	m^2/s
ρ	hustota	kg/m^3
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$
φ	relativní vlhkost	%
φ_r	součinitel osálení	-

použité indexy

p	přední deska otopného tělesa
z	zadní deska otopného tělesa

1. Úvod

Zaměření dnešní společnosti na snižování spotřeby energií klade nároky na každé odvětví lidské činnosti. Skutečnost, že podíl budov na celkové spotřebě energie v Evropské unii činí 40 % [1], zvyšuje nároky na technická zařízení budov. Jednou z největších položek dle spotřeby energie je bezesporu vytápění. Snaha snížit náklady na vytápění vyžaduje věnovat pozornost každému prvku otopné soustavy. Výrobci otopných těles přišli s nabídkou energeticky úsporných otopných těles. Vedle požadavku na zajištění příjemného vnitřního prostředí a estetickou funkci je nyní kladen nárok i na možnost úspor nákladů na vytápění. Dle výrobců úsporná tělesa uspoří až 15 % ročních nákladů na vytápění a zároveň přinesou vyšší komfort uvnitř vytápěné místnosti [2] [3].

Zdvojená a ztrojená desková otopná tělesa umožňují různá řešení regulace výkonu a hydraulického propojení desek. Na trhu se lze běžně setkat s tělesy s paralelním zatékáním, kdy teplotonosná látka zatéká současně do přední, zadní a případně i do střední desky současně. Jako energeticky úsporná tělesa jsou především označována tělesa s méně běžným sériovým zatékáním. Sériové zatékání spočívá v tom, že teplotonosná látka nejdříve proteče přední deskou a až posléze natéká do desky zadní. Další možností jak zasáhnout do hydraulického propojení desek je možnost samostatné regulace průtoku zadní deskou otopného tělesa až po možnost jejího úplného zavření.

1.1. Cíle diplomové práce

V diplomové práci se zaměřuji především na tělesa s jiným než běžně používaným paralelním průtokem. Laboratornímu měření jsem podrobil otopné těleso od společnosti Kermi, therm-x2 a od společnosti Korado, radik X-control. Na základě rešerše, podkladů výrobců a výsledků vlastního laboratorního měření bych rád zhodnotil přínos sériového zatékání u otopných těles. Získané teoretické poznatky a výsledky měření aplikuji v matematické simulaci za účelem ověření tvrzení výrobců o možnostech energetických úspor na vytápění.

2. Teoretická část

2.1. Požadavky na energeticky úsporná otopná tělesa

Příčinou hledání alternativního řešení zapojení víceřadých deskových otopných těles je jejich chování v přechodném období, kdy tělesa pracují v oblasti částečného zatížení. Tělesa navržená na návrhový stav při venkovní výpočtové teplotě jsou v přechodném období škrcena regulační armaturou na minimální průtok teplotonosné látky. Hmotnostní průtok tělesem pro docílení nižšího výkonu velmi prudce klesá [4]. Prospekty společnosti Kermi dokonce uvádí, že je nutné pro snížení tepelného výkonu o 54 % zredukovat průtok na 15 % [5]. Tím nedojde u běžných těles s paralelním zapojením desek k úplnému prohrátí. Povrchová teplota tělesa se lidem ve srovnání s tělesnou teplotou jeví jako chladná, pocitově nepříjemná [6]. Důsledkem je snaha o zajištění vysoké střední povrchové teploty na straně do místnosti. Tím dojde k vyššímu podílu sálavé složky výkonu, kterou lidské tělo vnímá příjemněji a pocit tepelné pohody se dostaví již při nižší teplotě vzduchu.

Výrobci energeticky úsporných otopných těles deklarují dostatečný výkon i při použití v nízkoteplotních systémech s tepelným čerpadlem nebo solárními kolektory. Dostatečné ochlazení teplotonosné látky je zas výhodné pro použití s kondenzačním kotlem.

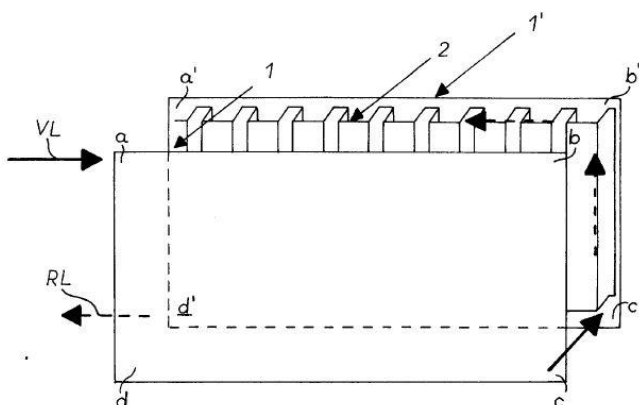
Malý objem a nízká hmotnost těles přispívají ke zkrácení doby náběhu. Kratší reakční doba umožňuje rychleji reagovat na vnější poruchové veličiny a změny požadované teploty. Rychleji se tak docílí tepelné pohody. Pro tělesa se dvěma deskami rozměrech 600x1000 je vodní obsah 6,3 l u tělesa Kermi x2 a 5,8 l u tělesa Korado X - control.

Velká variabilita připojení snižuje množství vyráběných typů těles a ulehčí tak zákazníkům výběr tělesa a jejich instalaci, výrobcům pak jejich skladování. Tělesa se vyrábí se spodním pravým, levým nebo středovým připojením. Například výrobce Henrad kombinuje možnosti středového a pravého spodního připojení, kdy je nevyužitá přípojka vybavena zásepkou.

2.2. Analýza rozličných řešení

Společnosti Kermi a Henrad (Henrad je člen sdružení Stelrad Group) nabízejí tělesa s čistě sériovým zapojením desek. Těleso s řízeným zatékáním nabízí společnost Korado.

Společnost Kermi uvádí způsob výroby sériového tělesa v přihlášce vynálezu číslo 2158-98 [6] a v dalším patentovém nároku 2002-2567 je uvedeno sériové těleso se spodním středovým připojením. Směřováním celého průtoku nejprve do čelní desky je průtok jednou deskou větší než při paralelním zapojení, to má za následek rychlejší náběh teploty přední desky. Následkem většího průtoku je střední povrchová teplota čelní desky vyšší než u klasického tělesa. Do zadní desky přitéká teplotonosná látka již ochlazená a střední povrchová teplota zadní desky je naopak nižší. Díky tomu nedochází k takovému zahřátí stěny za tělesem a klesá tak tepelná ztráta objektu. Společnost Kermi u svých těles s technologií x2 uvádí potenciál úspory energie 11 %, zvýšení sálavé složky tepla o 100 % a zkrácení doby náběhu tělesa o 25 %.

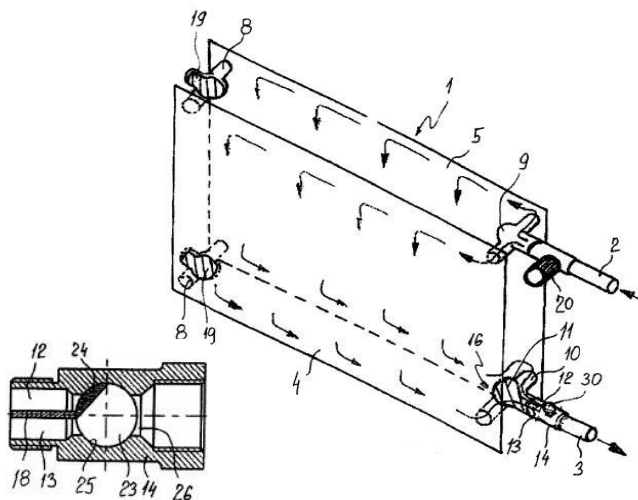


Obrázek 1: Sériové otopné těleso dle společnosti Kermi, přihláška vynálezu 2158 - 98

Stelrad díky technologii ECO nabízí úsporu tepelných ztrát o 8,8 % vlivem menšího sálání zadního panelu přispívající tak k celkové úspoře nákladů na vytápění o 10,5 %. Výhodou je rovněž 50% navýšení sálavé složky, o 23 % rychlejší doba náběhu a o 53 % vyšší teplota přední desky. Rozdíl v provedení obou výrobců spočívá ve vnitřním hydraulickém propojení. Kermi využívá spojovacího potrubí od napojení k regulační armatuře, odkud natéká látka do horní rozvodné komory čelní desky. Dolní sběrná komora je spojena armaturou se zadní deskou, kde voda kanálkem vystoupá do její horní rozvodné komory, aby mohla protéci deskou zadní. Těleso od společnosti Stelrad je uzpůsobeno tak, že od spodního napojení teplotonosná látka vystoupá do horní

rozvodné komory a proteče přední deskou, poté vystoupá kanálkem k regulační armatuře, přes kterou nateče do horní rozvodné komory zadní desky [3] [7].

Rozdílný přístup k energeticky úspornému tělesu zvolila společnost Korado. V roce 2013 přišla s tělesem s řízeným zatékáním. Při požadavku na nominální výkon je průtok zadní deskou otevřen a tělesem protéká teplotonosná látka stejně jako klasickým deskovým tělesem s paralelním zapojením.



Obrázek 2: Těleso s řízeným zatékáním podle užitého vzoru Korado 25744 z roku 2013. [8]

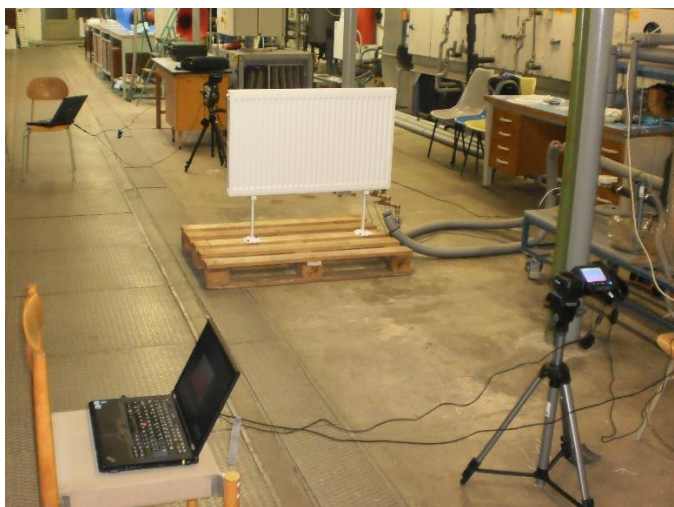
V přechodném období (pokrývající 87 % topné sezóny), kdy postačuje částečný výkon tělesa, je tedy možné uzavřít průtok zadní deskou a ponechat v provozu pouze desku přední. Při nastaveném průtoku pouze přední deskou je výkon tělesa 73 %. Docílí se tak vyšší teploty čelní desky i při sníženém výkonu se všemi výhodami, jež byly uvedeny výše.

Oproti tělesům se sériovým zatékáním je u tohoto řešení nižší tlaková ztráta [8]. S vyšší tlakovou ztrátou rostou náklady na provoz oběhového čerpadla. V případě, že bude uživatel využívat uzavírání průtoku zadní deskou, uvádí společnost Korado až 15% úsporu nákladů o 50 % rychlejší náběh tělesa a o 33 % nižší tepelnou ztrátu stěny za tělesem [2].

3. Laboratorní měření

3.1. Cíl měření

Cílem měření je získání středních povrchových teplot za ustáleného jmenovitého stavu důležitých pro vstup do počítačové simulace. Měřením ověřím pravdivost informací o rozdílných povrchových teplotách přední a zadní desky. Údaje z měření náběhu těles napomohou k poznání vnitřního proudění teplotnosné látky a dovolí srovnání s ostatními tělesy, tyto informace budu konfrontovat s údaji od výrobců.



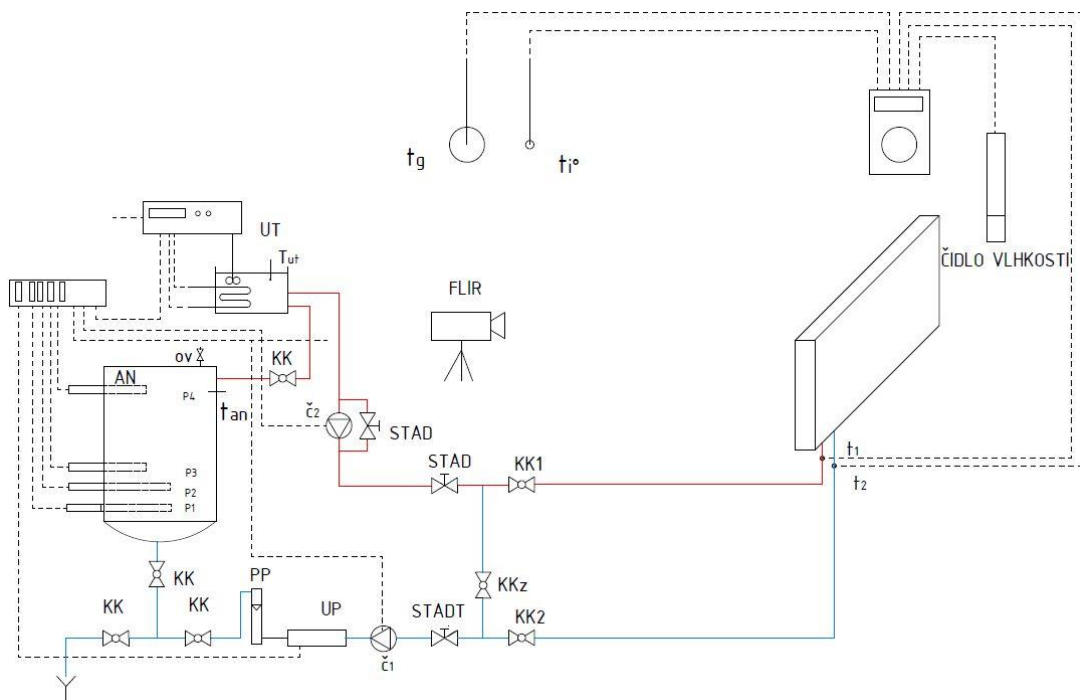
Obrázek 3: Oboustranné snímání tělesa v prostorách laboratoře.

3.2. Měřicí trať a zařízení

Měřicí trať spočívá v připojení otopného tělesa k mobilnímu zdroji tepla. Otopné těleso je na přívodu a na zpátečce opatřeno armaturou pro zavedení teplotního čidla. Těleso je umístěno na stojanové konzoly připevněné na paletě. Pomocí termokamery je ze vzdálenosti 2,5 m snímána přední a zadní strana tělesa, přičemž bylo nutné dbát na to, aby kamera byla nastavena kolmo k otopnému tělesu. Umístění tělesa v laboratoři je na Obrázek 3. Byly použity termokamery Flir ThermoCAM S65 pro snímání zadní desky a kamera Flir T460 snímající přední desku. Pro správné vyhodnocení snímků, pozdější výpočty a možné srovnání s dalším měřením byly odečítány hodnoty kulového teploměru a stíněného teploměru před a za tělesem a relativní vlhkost vzduchu.

Mobilní zdroj tepla sestává z ultratermostatu (UT) a s předřazenou akumulací nádrží (AN) se čtyřmi topnými tyčemi. Součástí zapojení jsou oběhová čerpadla,

vyvažovací ventily, uzavírací kohouty (KK1 a KK2), uzavírací kohout zkratu (KKz), plovákový a ultrazvukový průtokoměr (PP a UP). Zapojení dle schématu na Obrázek 4.



Obrázek 4: Schéma úlohy

Měření spočívalo v cvičném nastavení nominálního teplotního spádu 75/65/20 °C pro odečtení příslušného objemového průtoku z ultrazvukového průtokoměru a potřebného nastavení vyvažovacích ventilů. Měření předchází nahřátí akumulární nádrže a ultratermostatu. Otopné těleso je chladné, uzavírací kohouty jsou zavřené a teplotná látka protéká zkratem. Vlastní měření začíná odečtením všech hodnot okolního prostředí. Po spuštění termokamery je zkrat uzavřen a uzavírací kohouty otevřeny. Během měření je udržován požadovaný objemový průtok podle ultrazvukového průtokoměru a vstupní teplota. Během náběhu bylo nastaveno snímkování po vteřině. U tělesa Korado pokračovalo měření se snímkováním po 30 s z důvodů pozvolného ohřívání zadní desky v jejím zavřeném stavu. Po dosažení ustáleného stavu byly s odstupem pěti minut pořízeny vždy 3 snímky přední i zadní desky a odečteny všechny požadované hodnoty teplotné látky a okolního prostředí.

Nejdříve bylo měřeno těleso Kermi therm-x2 Profil-V Typ 12 (dle společnosti Kermi, jedná se o typ 21 se dvěma deskami a jedním konvekčním plechem) 600x1000 mm s připojením dole vpravo. Těleso Kermi jsem měřil podruhé pro teplotní spád 75/55/20 °C. Poté následovalo měření otopného tělesa Korado Radik X-control

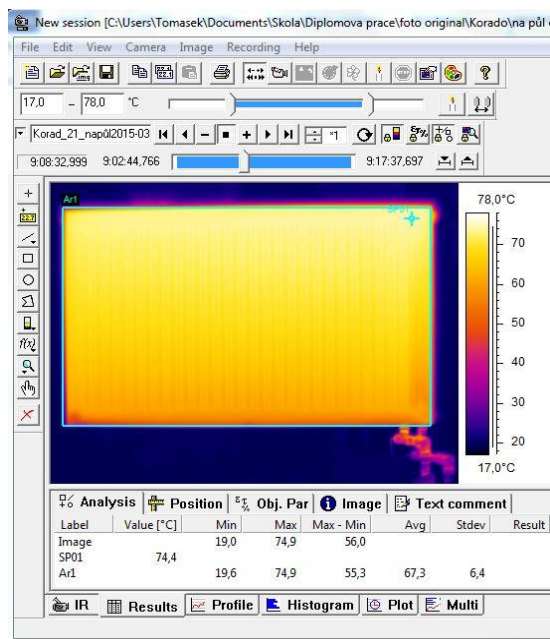
Profil-VK typ 21 600x1000 mm. Toto těleso bylo měřeno ve třech polohách ventilu pro nastavení průtoku zadní deskou, v poloze zavřeno, otevřeno a v poloze 1/2.

3.3. Výsledky měření

3.3.1. Měření v ustáleném stavu

Pro každé měření jsem s časovým odstupem třikrát odečítal údaje z měřicích přístrojů. Dále jsem pracoval s jejich průměrnou hodnotou. Měření výsledné teploty a teploty vzduchu před a za tělesem není reprezentativní důsledkem nevhodného umístění v laboratoři, kde se nešlo vyhnout ovlivnění osvětlením a proskleným stropem laboratoře. Protože hodnoty před tělesem a za tělesem byly velmi podobné, uvádím dále jen průměrnou hodnotu kulového teploměru a stíněného teploměru. Původní naměřené hodnoty jsou uvedeny na příloženém CD v příloze.

Při odečítání jsem zároveň pořídil snímek přední a zadní strany otopného tělesa termokamerou. Pomocí programu ThermoCAM Researcher jsem vyhodnotil střední povrchovou teplotu čelní a zadní desky. Pro správné vyhodnocení bylo třeba zadat vzdálenost kamery od tělesa, vlhkost a teplotu vzduchu, emisivitu povrchu a ohraničit obrys tělesa. Protože byla zadní strana otopného tělesa Korado snímána starší a méně přesnou kamerou provedl jsem korekci snímků. Korekce spočívala v nastavení teploty v referenčním bodě. Referenční bod jsem zvolil v místě přívodu teplotonosné látky. Na Obrázek 5 jde vidět ohraničená plocha tělesa s referenčním bodem. Pro zcela otevřené těleso program ThermoCAM Researcher spočítal potřebnou emisivitu. Takto spočtená emisivita vycházela pro různé snímky v rozmezí 0,74 až 0,75. Průměrné naměřené hodnoty uvádí tabulka 1.



Obrázek 5: Program ThermoCAM Researcher, odečítání hodnot referenční bod.

Tab. 1: Průměrné odečítané hodnoty

	t_1 [°C]	t_2 [°C]	$t_{g,s}$ [°C]	$t_{a,s}$ [°C]	\dot{V} [m ³ /h]	φ [%]	$t_{s,p}$ [°C]	$t_{s,z}$ [°C]
Kermi	74.8	64.6	19.1	19.0	0.107	32.0	70.7	66.0
Korado zavřeno	75.2	65.3	20.3	20.4	0.098	33.7	70.6	54.4
Korado 1/2	75.0	64.9	19.8	19.5	0.110	25.7	70.0	69.6
Korado otevřeno	75.3	65.1	20.3	20.1	0.111	34.4	69.4	70.7
Kermi 75/55/20	74.9	55.0	19.6	19.5	0.051	32.0	68.4	59.9

Největší rozdíl středních povrchových teplot mezi přední a zadní deskou je naměřen u tělesa Korado se zavřenou zadní deskou 16,2 K. Otevřením uzavíracího ventilu zadní desky klesá průtok přední deskou a její střední povrchová teplota mírně klesá. Při otevření ventilu jsou desky spojeny paralelně a jejich střední povrchová teplota by měla být stejná. Při úplném otevření jsem naměřil střední povrchovou teplotu zadní desky o více než 1 K teplejší. Volba emisivity při vyhodnocování snímků nemá tak velký vliv na teplotu aby tento rozdíl sama zapříčinila. Dalším faktorem může být použití dvou různých termokamer nebo může docházet k intenzivnějšímu proudění zadní deskou tělesa. Rozdíl mezi plně otevřeným ventilem průtoku a polovičním nastavením je minimální.

U čistě sériového tělesa Kermi je střední povrchová teplota na zadní straně tělesa o 4,7 K nižší než teplota desky čelní. Tento rozdíl se přibližně zdvojnásobí při nastavení

teplotního spádu 75/55 °C. Mohu očekávat, že s dalším škrcením průtoku bude rozdíl výraznější. Při částečném zatížení bude čelní deska otopného tělesa výrazně teplejší než deska zadní. Střední teplota čelní desky je o 3,4 K teplejší než střední teplota vody.

Pro výpočet podílu sálavé složky a konvektivní složky tepelného výkonu je třeba znát hustotu a měrnou tepelnou kapacitu vody. Tyto veličiny jsem vztáhl ke střední teplotě vody v tělese [9].

(1)

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{75 + 55}{2} = 65 \text{ °C}$$

(2)

$$c = 4187,8 \cdot (0,6741 + 2,825 \cdot 10^{-3} \cdot T_m - 8,371 \cdot 10^{-6} \cdot T_m^2 + 8,601 \cdot 10^{-9} \cdot T_m^3)$$

(3)

$$\rho = 1000 - (t_m - 4) \cdot [0,097 + 0,0036 \cdot (t_m - 4)]$$

Pomocí kalorimetrické rovnice jsem vypočítal tepelné výkony otopných těles.

(4)

$$Q = \dot{V} \cdot \rho \cdot c \cdot (t_1 - t_2)$$

Tab. 2: Výkony otopných těles

	t_m [°C]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	Q [W]
Kermi	69.7	978.1	4210.0	1246
Korado zavřeno	70.3	977.7	4210.3	1109
Korado 1/2	70.0	977.9	4210.1	1277
Korado otevřeno	70.2	977.8	4210.3	1283
Kermi 75/55/20	65.0	980.7	4207.7	1162

Nominální tepelný výkon uváděný výrobcem je u tělesa Korado 1288 W a u tělesa společnosti Kermi 1229 W. Mnou naměřené tepelné výkony jsou přibližně srovnatelné, přestože měření neprobíhá v měřicí komoře a těleso je umístěné v prostoru namísto u zdi. Dle tvrzení výrobce by těleso Korado se zavřenou zadní deskou mělo mít 73 % výkonu plně otevřeného tělesa [2]. Podle mého měření provoz se zavřenou zadní deskou představuje 86,4 % tepelného výkonu plně otevřeného tělesa. Z výsledků dále

vyplývá, že poloviční nastavení ventilu ovládajícího průtok zadní deskou nemá významný vliv na nominální výkon tělesa.

Pro stanovení výkonu sdíleného sáláním je třeba spočítat střední radiační teplotu prostoru [9].

(5)

$$T_{r,m} = \sqrt[4]{T_g^4 + 183 \cdot 10^5 \cdot \alpha_{cg} \cdot (t_{g,s} - t_{a,s})}$$

Kde α_{cg} je součinitel přestupu tepla konvekcí pro kulový teploměr a je rovný 4,1 W/m²K

(6)

$$\dot{Q}_{r,p} = S_p \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_{s,p}^4 - T_{r,m}^4] \cdot \varphi_r$$

Kde S_p je plocha přední desky, kterou uvažují poloviční oproti povrchu obálky celého tělesa. Hodnota emisivity ε je 0,95. σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta a součinitel osálení φ je roven jedné, protože těleso je zcela obklopeno okolními zdi. Stejnou rovnicí můžeme použít i pro zadní stranu tělesa rovnice (7).

(7)

$$\dot{Q}_{r,z} = S_z \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_{s,z}^4 - T_{r,m}^4] \cdot \varphi$$

Tepelný výkon předaný konvekcí vypočítám jako rozdíl celkového tepelného výkonu a výkonů předaných sáláním.

(8)

$$\dot{Q}_c = \dot{Q} - (\dot{Q}_{r,p} + \dot{Q}_{r,z})$$

(9)

$$S_a = \frac{\dot{Q}_r}{\dot{Q}} \cdot 100$$

(10)

$$K_o = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}} \cdot 100$$

$S_{a,p}$ je podíl tepla předaný sáláním z přední desky, $S_{a,z}$ je podíl tepla předaný ze zadní desky a K_o je podíl tepla předaný konvekcí.

Tab. 3: Podíl tepla sdílený do okolí sáláním přední a zadní desky a podíl tepla sdílený konvekcí

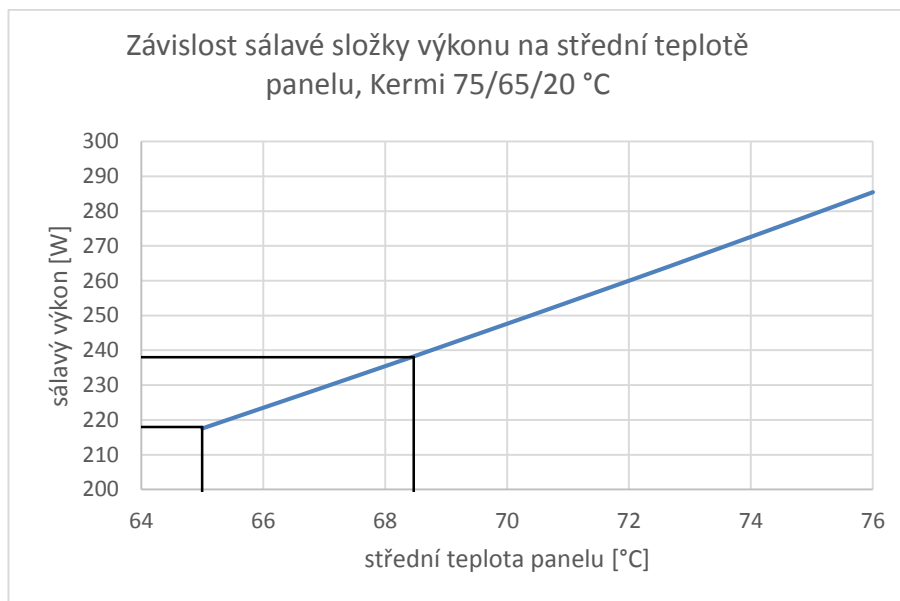
	t_{rm} [°C]	$Q_{r,p}$ [W]	$Q_{r,z}$ [W]	Q_c [W]	$S_{a,p}$ [%]	$S_{a,z}$ [%]	K_o [%]
Kermi	19.2	254	226	767	20.4	18.1	61.5
Korado zavřeno	20.4	249	101	759	22.4	14.0	63.5
Korado 1/2	19.9	247	245	785	19.3	19.2	61.5
Korado otevřeno	20.4	241	250	792	18.8	19.5	61.7
Kermi 75/55/20	19.9	238	188	735	20.5	16.2	63.3

Uvedené podíly tepla sdílené sáláním a konvekcí je opět nutné brát s ohledem na skutečnost, že těleso je umístěné v prostoru a nikoliv u zdi. Střední radiační teplota je uvažována stejná před tělesem i za tělesem. Podle Tab. 3 největší část sálavého výkonu směrem do prostoru vydá těleso Korado s uzavřeným průtokem zadní deskou. Zároveň je u tohoto tělesa nejvyšší podíl konvektivní složky výkonu. Tohoto ustáleného stavu se navíc docílilo velice pozvolna, neboť docházelo k velmi pomalému nárůstu teploty na zadní desce. Více uvedu v kapitole o náběhu těles. U tělesa Kermi je podíl sálání čelní desky o 2,3 % vyšší než desky zadní. Při teplotním rozdílu 20 K klesl podíl sálání zadní desky o 2 %, zároveň o 2 % vzrostl podíl konvekce na tělese.

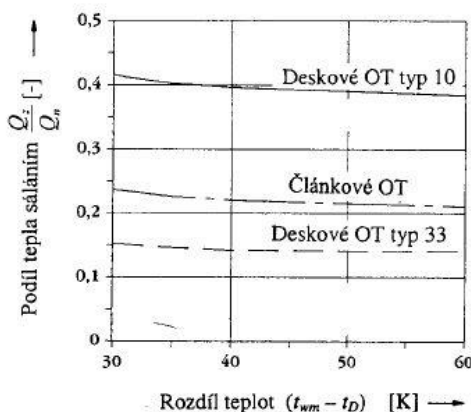
Sériovým zapojením desek nebo omezováním průtoku zadní deskou dochází ke snížení střední povrchové teploty zadní desky a tím ke snížení výkonu celého tělesa. Pokud bych uvažoval u klasického (paralelně zapojeného) tělesa střední povrchovou teplotu 70 °C nedochází u sériového zapojení k výraznějšímu zvýšení teploty čelní desky. Pro teplotní spád 75/55 °C je střední povrchová teplota tělesa Kermi 68,5 °C což je jen o 3,5 K více než střední teplota vody 65 °C. Tento teplotní rozdíl představuje dle rovnice (6) nárůst sálavé složky výkonu o 20 W. Rozdíl je znázorněn na Obrázek 6. Zvýšením teploty přední části tělesa dochází zároveň i ke zvyšování konvektivní složky výkonu. Podle Obrázek 7 může konvektivní složka výkonu se zvyšující se teplotou narůstat rychleji než sálavá složka a dle rovnice (11) podíl sálavého výkonu na celkovém výkonu tělesa bude klesat [10].

(11)

$$\dot{Q} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_s$$



Obrázek 6: Nárůst sálavé složky výkonu při změně teploty čelní desky o 3,5 K



Obrázek 7: Podíl tepla sáláním v závislosti na rozdílu teplot [10].

Údaje výrobců o navýšení sálavé složky nemohu potvrdit. S uvažováním správného umístění tělesa u zdi a tím vyšší radiální teploty za tělesem ještě více klesne sálavý výkon zadní desky, zatímco sálání z čelní desky zůstane nezměněno. To bude mít za následek ještě větší podíl konvekce na celkovém výkonu otopného tělesa. Výrobci ve svých materiálech neuvádí, vzhledem k jaké hodnotě je nárůst sálavé složky tepla vztažený. Pokud byly údaje o vyšším podílu sálání vztaženy k zadní straně tělesa, je pravdou, že sálání čelní desky je mnohem intenzivnější než sálání zadní desky. Toho je však dosaženo snížením sálavé složky zadní desky nikoliv navýšením sálavého výkonu na přední straně tělesa.

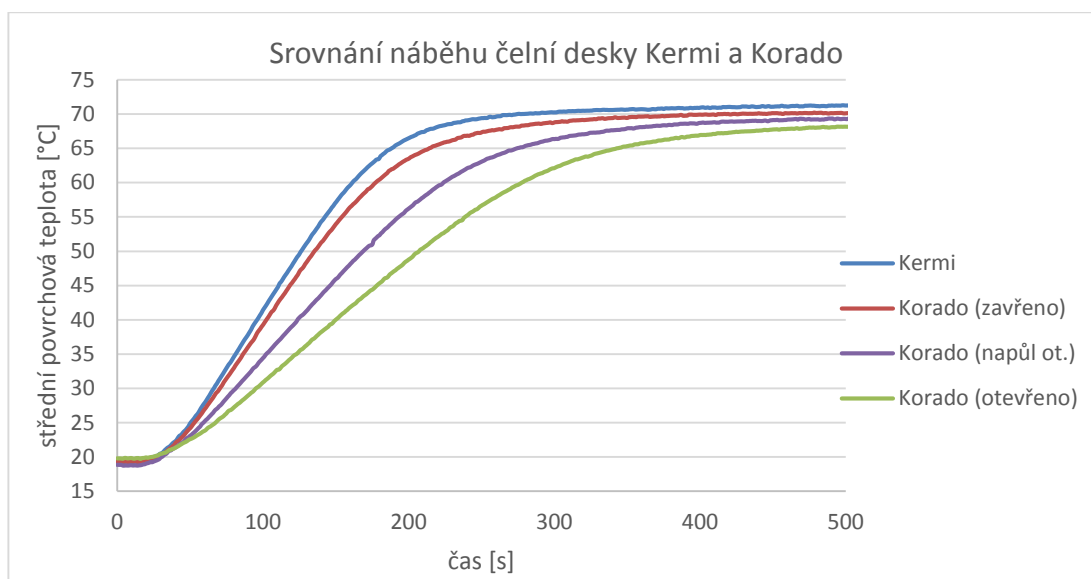
3.3.2. Měření náběhu otopných těles

Jak jsem již předepsal v úvodu, výrobci zkoušených těles Kermi therm x2 a Korado X-control deklarují rychlejší náběh tělesa oproti tělesům s klasickým paralelním zapojením. Využiji toho, že se Korado, s plně otevřenou zadní deskou, chová jako těleso s paralelním zatékáním. Je tedy možné všechny naměřené náběhy těles porovnat s náběhem tělesa s paralelním zapojením desek.

Naměřená data bylo nutno upravit z hlediska různého dopravního zpoždění způsobeného ručním spouštěním termokamery a ručním ovládáním kulových ventilů na měřící trati. V průběhu měření se nebylo možné vyhnout automatickému kalibrování kamery Flir S65. Kalibrace způsobila v naměřených hodnotách skokovou změnu. Kde to bylo možné, upravit jsem naměřená data tak, aby dva odpovídající si snímky přední a zadní desky odpovídali v referenčním bodě. Tato úprava se týkala pouze hodnot zadních desek, které byly snímány touto kamerou. Přesto na některých náběžích je kalibrace kamery patrná.

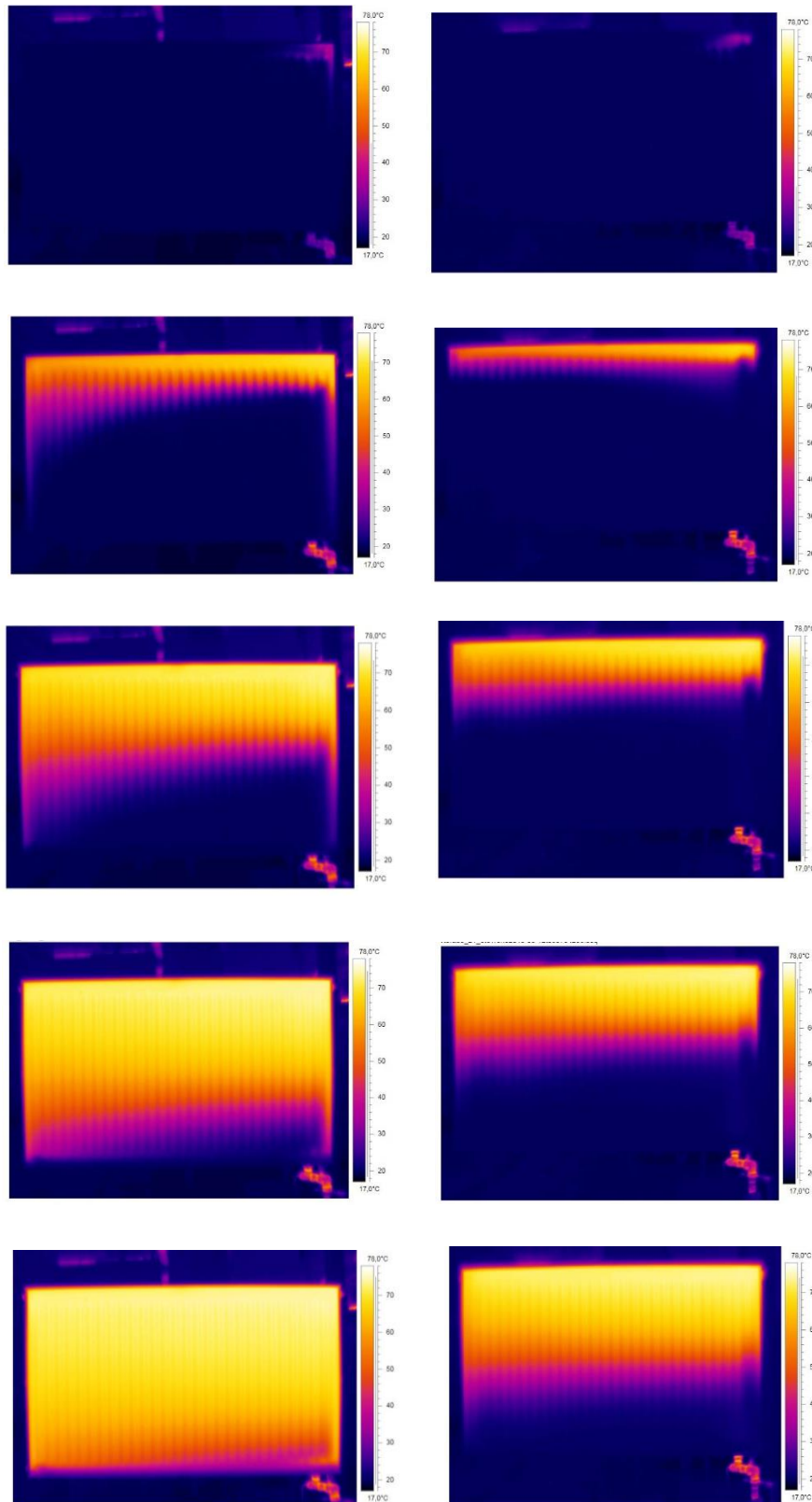
Na Obrázek 8 jsou porovnány náběhy střední povrchové teploty čelní desky pro těleso Kermi a tři měřené stavy tělesa Korado. Pro teplotní spád 75/55/20 °C jsem teplotní náběh tělesa neměřil.

Uzavřením průtoku zadní deskou došlo ke značnému zrychlení náběhu desky čelní. V případě sériového propojení desek u tělesa Kermi je náběh čelní desky ještě rychlejší, přestože objem tělesa je 6,3 l oproti 5,8 l u tělesa Korado. Je to dáno o 10 % vyšším průtokem u tělesa Kermi.



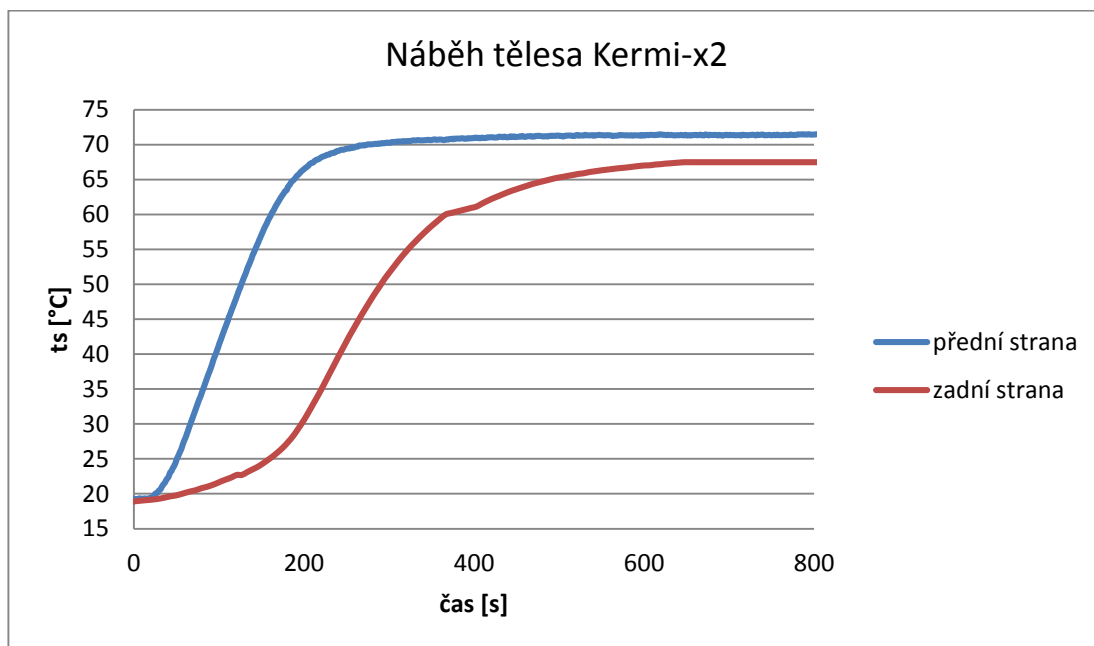
Obrázek 8: Srovnání náběhu čelní desky tělesa Kermi a Korado

Na následujících snímcích na Obrázek 9 jsou ve sloupcích porovnány snímky přední desky tělesa Kermi (vlevo) a Korado s otevřeným průtokem zadní deskou (vpravo) s krokem 40 s. Snímky znázorňují rozdíl v rychlosti náběhu mezi nejrychlejším a nejpomalejším změřeným náběhem.



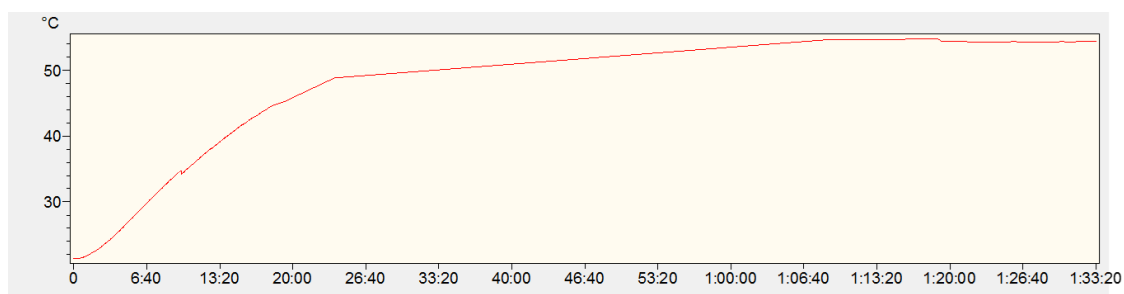
Obrázek 9: Porovnání náběhu čelní desky tělesa Kermi (vlevo) a tělesa Korado s otevřeným průtokem zadní deskou (vpravo) v čase 0 s, 40 s, 120 s a 160 s

Nesmíme zapomenout, že část výkonu je předávána i zadní deskou, jejíž náběh je naopak zpožděn. Na Obrázek 10 je srovnání náběhu čelní a zadní desky u tělesa Kermi. Počáteční nárůst teploty zadní desky je způsobený vedením tepla v oblasti armatur. K hlavnímu nárůstu teploty dochází až po prohřátí čelní desky, kdy už teplotonosná látka protékla celou přední deskou, asi po třech minutách. Zakolísání teploty na zadní desce je způsobeno kalibrací kamery.

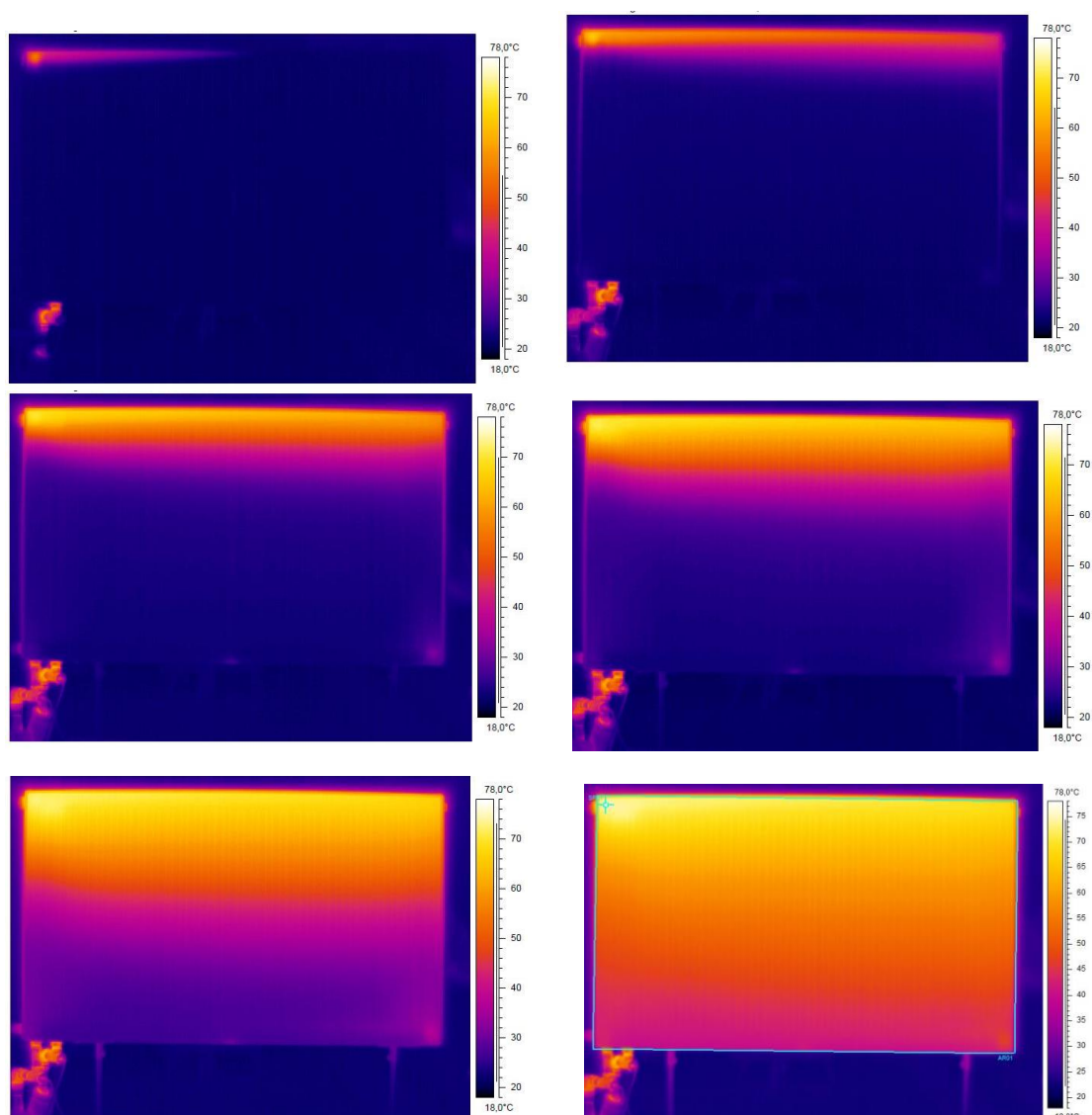


Obrázek 10: Porovnání náběhu přední a zadní desky tělesa Kermi

Jiná situace nastává u tělesa Korado, kde je průtok zadní deskou zvlášť škrcen na odtokové armatuře. Snímkování zadní části tělesa při uzavřeném průtoku zadní deskou ukázalo, že v horní rozvodné komoře dochází k protékání teplotonosné látky od nátokové strany s regulačním ventilem ke druhé straně s odvzdušňovací armaturou. Již po 20 minutách dochází ke zdánlivému ustálení teploty, ale i po této době střední povrchová teplota zadní desky pomalu narůstá. Pro zachycení tohoto pozvolného nárůstu jsem nastavil na kameře snímkování po 30 vteřinách na dobu přibližně jedné hodiny. Po této době došlo k úplnému ustálení, Obrázek 11 a Obrázek 12

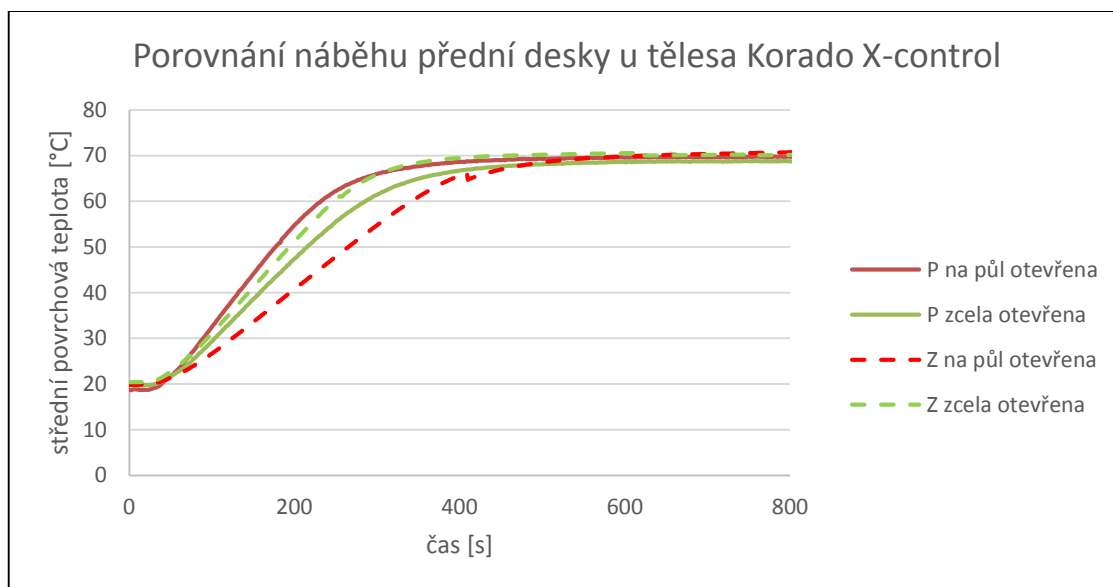


Obrázek 11: Nárůst střední povrchové teploty zadní desky u tělesa Korado se zavřenou zadní deskou. Výstup z programu ThermoCAM Researcher



Obrázek 12: Sekvence znázorňující postup zahřívání zadní desky tělesa Korado se zavřenou zadní deskou v čase 1 min, 4 min, 7 min, 10 min, 18 min a 60 min.

Pro zbylá dvě nastavení průtoku zadní deskou tělesa Korado platí Obrázek 13. Ventil v prostřední poloze způsobuje pomalejší náběh zadní desky oproti desce přední. Po 9 minutách dojde k ustálenému stavu na přibližně stejné teplotě (teploty jsou uvedeny v kapitole 3.3.1 Tab. 1). S plně otevřeným průtokem zadní deskou je náběh zadní desky dokonce rychlejší než přední a její teplota se rovněž ustálila na vyšší hodnotě. Porovnáním s náběhem tělesa Kermi na Obrázek 10 zjistíme, že Korado s otevřeným ventilem docílí ustáleného stavu rychleji. Opět platí, že Korado v otevřené poloze má vyšší průtok teplotonosné látky než těleso Kermi.



Obrázek 13: Porovnání náběhu přední a zadní desky tělesa Korado. P – přední deska; Z - zadní deska

3.4. Závěr laboratorního měření

U sériově zapojených desek otopného tělesa je skutečně zadní deska o několik stupňů chladnější než deska přední. V mém měření tělesa Kermi therm-x2 je tento rozdíl 4,7 °C. Vlivem tohoto rozdílu předá zadní část tělesa o 2,3 % méně tepla sáláním než přední část. Tento výpočet byl proveden s předpokladem stejné teploty před tělesem i za tělesem. Pro vyšší teplotní spád jsou tyto rozdíly výraznější. Velký vliv má sériové zapojení na rychlost náběhu přední desky, kdy došlo k ustálení její střední povrchové teploty po 250 vteřinách. Oproti tělesu Korado v otevřeném stavu, které považuji za klasické těleso s paralelním průtokem, je to poloviční doba.

Pro těleso Korado X-control s řízeným zatékáním zadní deskou jsem naměřil po dlouhodobém ustálení nejvyšší rozdíl středních povrchových teplot mezi přední a zadní

deskou a to 16,2 °C. Došlo tím ke snížení celkového výkonu, což mělo za následek navýšení podílu sálání z čelní desky o 2 %. Zároveň došlo k navýšení podílu konvekce na celkovém výkonu také o 2 %. Při nastavení ventilu do polohy otevřeno byla dokonce zadní deska teplejší než přední, rovněž zadní deska nabíhala rychleji než přední. Uzavřením ventilu pak došlo ke zkrácení doby náběhu čelní desky na přibližně stejnou hodnotu jako u sériového tělesa Kermi, tedy na 50 %.

Údaje výrobců o navýšení podílu sálavé složky se tak zdají býti přehnané. K výraznému navýšení sálavé složky z čelní desky nedochází, naopak sálavá složka zadní desky je silně potlačena. Potom je pravdivé tvrzení, že podíl sálavé složky do prostoru je o mnoho větší než sálání směrem ke zdi.

Měření částečně potvrdilo zkrácení doby náběhu. Byla však uvažována jen teplota čelní desky. Na výkonu tělesa se podílí i zadní část, jež má oproti přední desce dopravní zpoždění. Na době náběhu se podílí především objemový průtok tělesem. V případě sériového tělesa proudí teplonosná látka rychleji, ale musí protéci delší trasu tělesem. Pokud uvažuji jen čas náběhu přední desky, naměřené údaje odpovídají katalogovým hodnotám uváděným výrobcem.

4. Počítačová simulace

4.1. Modelování

K posouzení chování těles v simulační místnosti jsem zvolil platformu Workbench od společnosti ANSYS. V platformě Workbench jsou zahrnuty nástroje pro tvorbu modelu, sítě, výpočtu i vyhodnocení.

Model jsem vytvořil v programu Design Modeler. Následně je zasíťován programem Ansys Meshing a vstupuje do výpočetního programu Fluent. Model představuje místnost 6 x 4 x 3 m s oknem o rozměrech 1,6 x 1,6 m a deskovým tělesem umístěným u delší stěny místnosti. Desky otopného tělesa tvoří dva obdélníky 600 mm vysoké, 1600 mm dlouhé a 10 mm široké. Celková šířka tělesa je 62 mm a je umístěno 50 mm od zdi a 80 mm nad podlahou. Místnost jsem rozdělil na dvě symetrické části rovinou, která prochází středem okna a otopného tělesa.

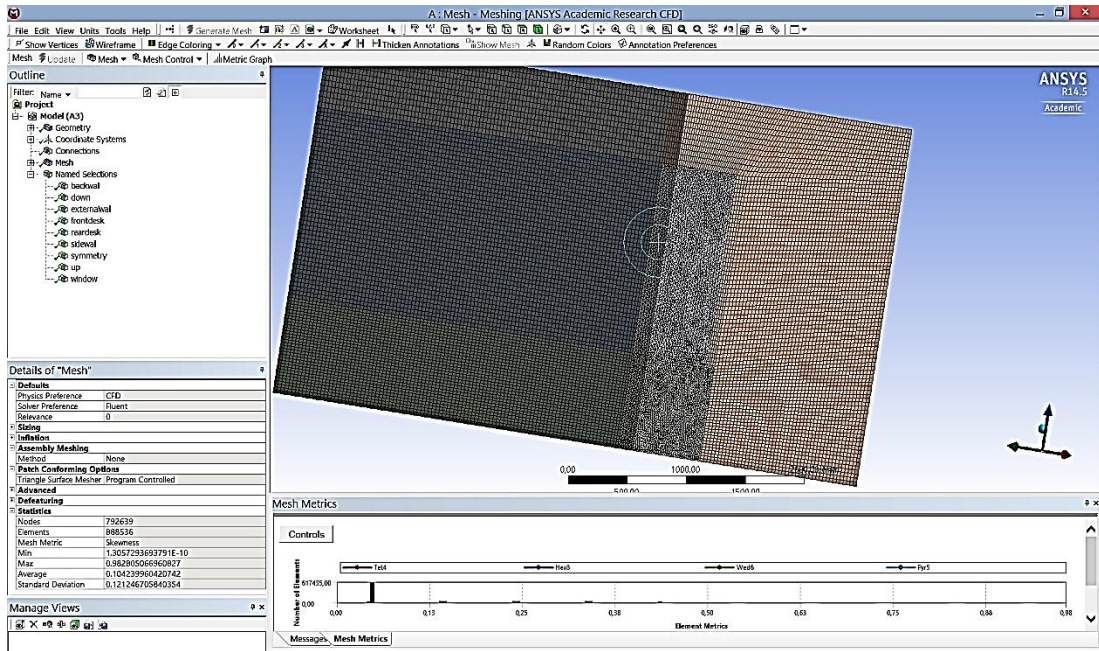
Symetrickou část místnosti jsem rozdělil do několika menších objemů.

- „První“ menší objem zahrnuje prostor s otopným tělesem. Tento prostor jsem pomocí nástroje „sizing“ vyplnil menšími buňkami o velikosti 25 mm.

- „Druhý“ objem zahrnuje prostor u okna a je vyplněn buňkami o velikosti 30 mm. Pro tyto dvě části jsem zvolil typ sítě sestávající z tetrahedronů. Vzhledem k členitosti v okolí tělesa a změně velikosti buněk směrem do místnosti mi volba tetrahedronů přinese zlepšení kvality sítě. Mohu sledovat například hodnotu Skewness (šikmost) znázorňující míru deformace buněk sítě a počet takto zdeformovaných buněk. Buňky s velkou šikmostí zhoršují konvergenci během výpočtu.

- „Třetí“ oblast středu místnosti jsem vyplnil hexahedronovou sítí o velikosti 45 mm.

- Zbývající část u stěn zaujímají buňky o velikosti 40 mm. Takto jsem vytvořil síť o 888536 buňkách. Znázornění rozčlenění objemu ukazuje Obrázek 14.



Obrázek 14: Rozčlenění modelu na více částí z důvodů volby hustoty sítě.

4.2. Nastavení simulace

Před samotným výpočtem jsem ručně ověřil podle rovnice (12) charakter proudění [10]. Hodnoty α , β , μ , ρ jsou vztaženy pro teplotu 40 °C přibližně odpovídající střední hodnotě soustavy těleso – vzduch v místnosti. Rozdíl teplot ΔT uvažuji jako rozdíl střední povrchové teploty tělesa a teploty vzduchu, 50 °C.

(12)

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot l^3 \cdot \rho}{\mu \cdot \alpha} = \frac{9,81 \cdot 3,19 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 0,6^3 \cdot 1,18}{19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 2,21 \cdot 10^{-5}} = 9,34 \cdot 10^8 [-]$$

Podle Kozubkové [10] charakterizují hodnoty Rayleighova čísla $Ra < 10^8$ laminární proudění a hodnoty $10^8 < Ra < 10^{10}$ přechod do turbulence.

Závislost hustoty vzduchu na teplotě volím polynomicickou ve tvaru (13) podle hodnot uvedených v [11]. Další vlastnosti vzduchu jako měrnou tepelnou kapacitu, tepelnou vodivost a viskozitu nechávám nastavené výchozí konstantní hodnoty.

(13)

$$\rho = -0,00000005 \cdot T^3 + 0,00006 \cdot T^2 - 0,0263 \cdot T + 4,9954$$

Jedná se o nestacionární úlohu, protože vzduch stoupající kolem otopného tělesa se střetává s chladným vzduchem od okna a dochází k nestacionárnímu proudění. Při snaze řešit úlohu jako statickou nedojde k dostatečné konvergenci reziduí. Jako dostatečnou konvergenci uvažuji pro rovnice kontinuity hodnoty v řádech 10^{-3} a nižší. Dále zvolím řešič typu Density based, který reprezentuje numerické řešení založené na paralelním řešení všech neznámých veličin v obsažených v rovnici kontinuity, Navierových-Stokesových rovnicích a energetické rovnici. S ohledem na dispozici modelu uvažuji gravitační zrychlení v ose „z“.

Nastavil jsem dvourovnicový *standart* $k - \varepsilon$ model turbulence založený na transportních rovnicích pro kinetickou energii turbulence a rychlost disipace energie. Pro takto zvolený model turbulence je nutné vybrat adekvátní vyjádření proudění v mezní vrstvě. K tomu je třeba znát hodnotu bezrozměrné odlehlosti od stěny „ y^+ “. Hodnotu bezrozměrné odlehlosti od stěny získám přímo z Fluentu, ale úzce souvisí s jemností sítě. Pro moji síť jsou průměrné hodnoty bezrozměrné odlehlosti od stěny v řádu jednotek, což dovoluje použít „enhanced wall treatment“ pro vyjádření proudění v blízkosti stěny.

Pro nastavení radiace jsem využil S2S (surface to surface) model. K tomuto modelu je třeba nechat spočítat tzv. „view factor“ podle kterých jsou uvažovány geometrické parametry stěn modelu.

Úloha je zadána implicitně a veškeré diskretizace jsem nastavil druhého řádu. Inicializoval jsem úlohu pro vnitřní teplotu 20 °C.

4.3. Okrajové podmínky

Boční stěnu, zadní stěnu, strop a podlahu jsem definoval jako adiabatickou stěnu, kde tepelný tok stěnou je roven nule. Okrajová podmínka na venkovní stěně a oknu je zadána přes přestup tepla na venkovní straně a venkovní teplotu vzduchu. Podmínka je doplněna o vlastnosti materiálu okna a zdi viz Tab. 4. Vlastnosti stěny jsou voleny tak, aby vnitřní teplota vzduchu v místnosti vycházela přibližně 20°C a zároveň součinitel prostupu tepla stavební konstrukcí odpovídal normě ČSN 75 0540.

Tab. 4: Zadání okrajových podmínek ochlazované stěny, materiálové vlastnosti.

Fyz. vlastnost	Jednotka	Okno	Venkovní zed'
Souč. přestupu tepla	W/m ² K	25	25
Tepelná vodivost	W/mK	0,6	0,125
Hustota	Kg/m ³	2400	700
Šířka	m	0,3	0,4
Měrná tepelná kapacita	J/kgK	1000	1000

Pro takto zvolené parametry mohu dle rovnice (14) vypočítat součinitel prostupu tepla U . Odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce jsem zvolil 0,13 m²K/W [12].

(14)

$$U_{stěny} = \frac{1}{R_{si} + \sum R + R_{se}} = \frac{1}{R_{si} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{1}{0,13 + \frac{0,4}{0,125} + \frac{1}{25}} = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{okna} = \frac{1}{0,13 + \frac{0,3}{0,6} + \frac{1}{25}} = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

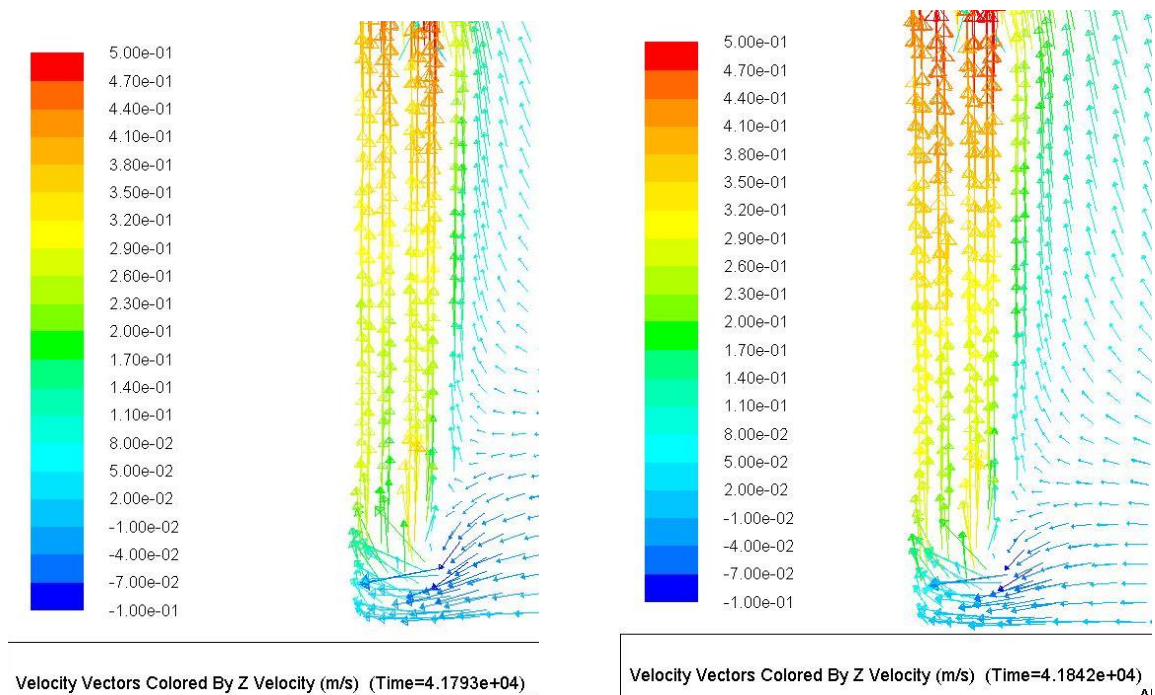
Nejhorší možné požadované hodnoty podle normy ČSN 75 0540 jsou pro vnější stěnu 0,3 W/m²K a pro výplň otvoru ve vnější stěně 1,5 W/m²K [13].

Povrchovou teplotu čelní desky jsem zvolil podle výsledků laboratorního měření tělesa Korado se zavřenou zadní deskou 70.7 °C a teplotu zadní desky 54.4 °C. Pro takto nastavené těleso jsem naměřil největší rozdíl středních povrchových teplot mezi přední a zadní deskou tělesa. Pro simulaci paralelního tělesa jsem zvolil povrchové teploty přední a zadní desky shodně 70 °C aby odpovídala střední teplotě vody u běžného tělesa s paralelním zatékáním.

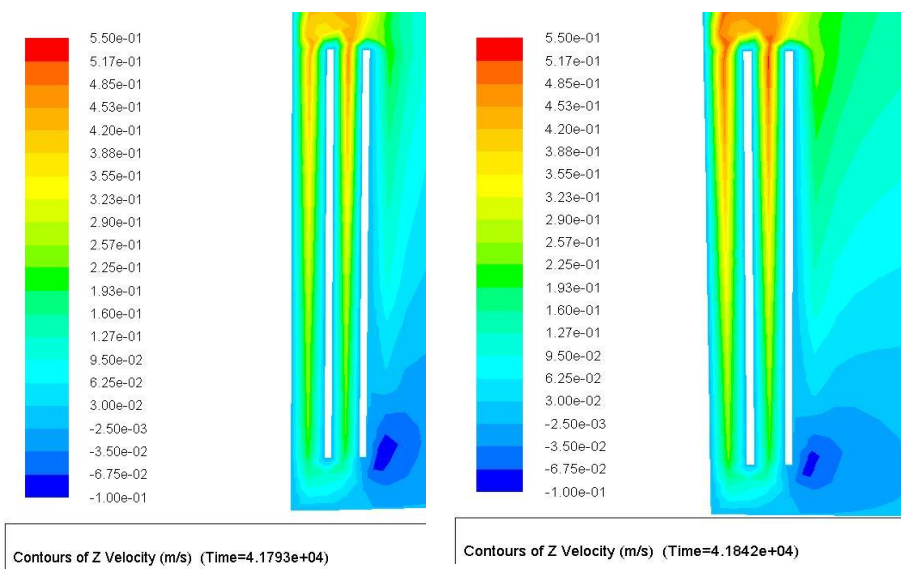
4.4. Výsledky simulace

Simulaci jsem nejdříve spustil s velkým časovým krokem, aby se co nejdříve dosáhlo dostatečně vyvinutého proudění uvnitř místnosti. Sledoval jsem konvergenci reziduí, jejichž hodnota se ustálila na hodnotách v řádu 10^{-4} . Bylo nutné nasimulovat několik hodin s krokem 60 s, aby došlo k ustálení stavu proudění a toků tepla v modelu.

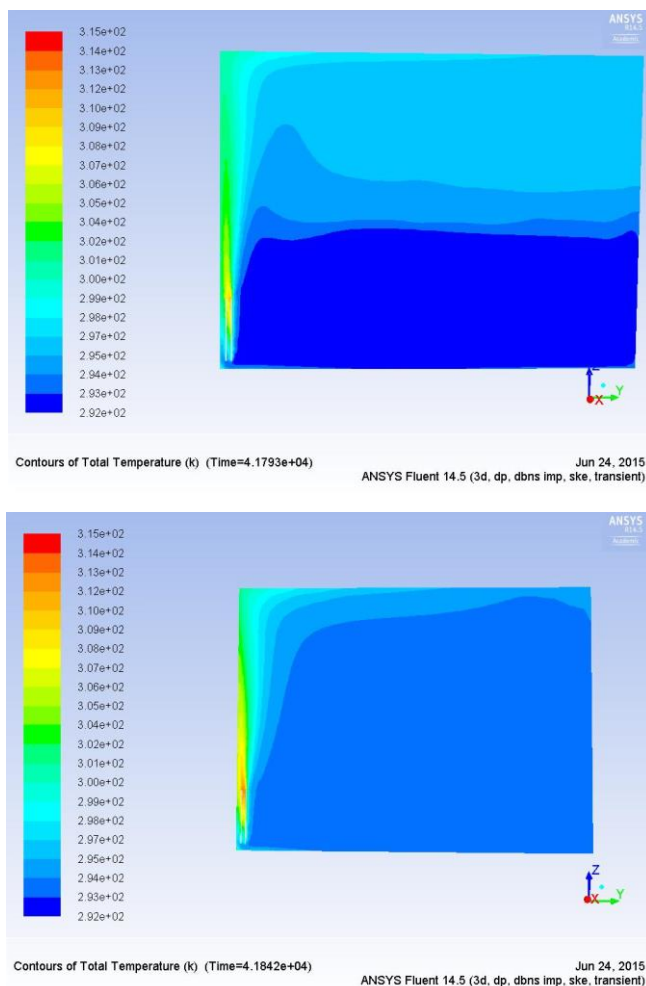
Na Obrázek 15 jsou zobrazeny vektory rychlosti v okolí tělesa a na Obrázek 16 je pro názornost vybarvena rychlost v konturách. Na levém snímku je těleso se zadní chladnější deskou. Rychlost proudění u tohoto tělesa je nižší a proudění mezi stěnou a zadní deskou je slabší než u standardního tělesa, obrázek dole. U standardního tělesa je intenzita proudění mezi stěnou a deskou srovnatelná s prouděním mezi deskami.



Obrázek 15: Levý snímek ukazuje obraz proudění v rovině symetrie pro těleso se zadní chladnou deskou, pravý snímek pak pro desku teplou.

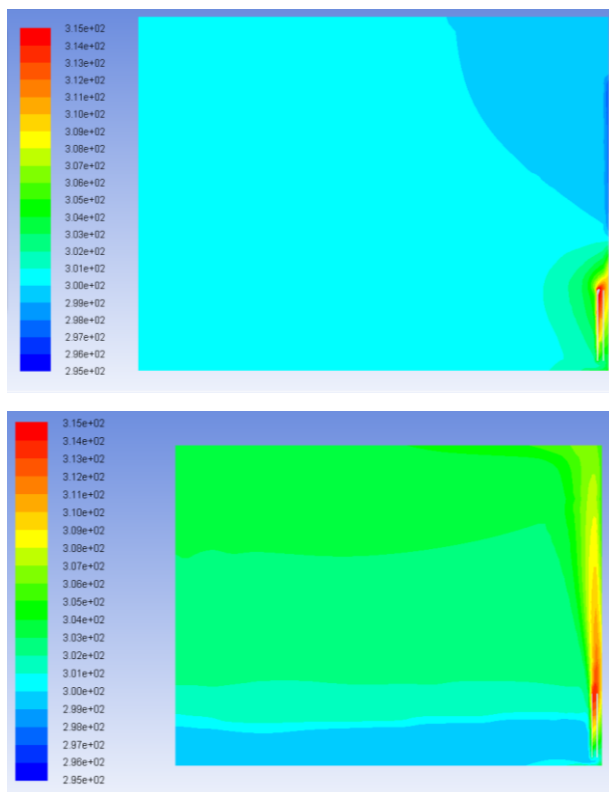


Obrázek 16: Rychlost ve vertikálním směru v konturách. Nalevo je těleso s chladnější zadní deskou, napravo klasické těleso.



Obrázek 17: Rozložení výsledné teploty pro model s chladnější zadní deskou nahoře, pro model klasického tělesa dole.

Rozložení výsledné teploty v místnosti v rovině symetrie je na Obrázek 17. Pokud je výkon tělesa dostatečný k otočení chladných konvektivních proudů od okna, nedochází k výrazným odlišnostem v obrazech proudění. Pro případ vysoké tepelné prostupnosti okna ($3 \text{ W/m}^2\text{K}$) nastane u tělesa s chladnější zadní deskou k padání chladných proudů od okna, zatímco klasické těleso poskytuje ještě dostatečný výkon, Obrázek 18.

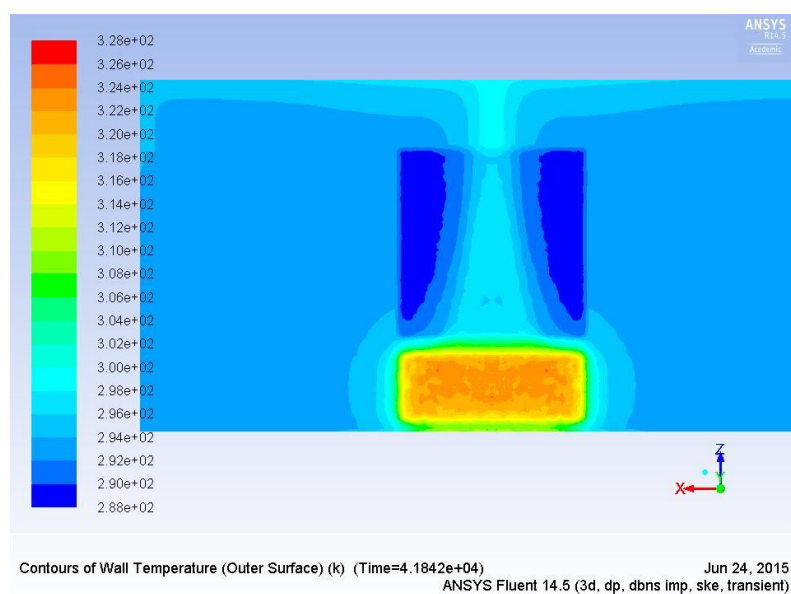
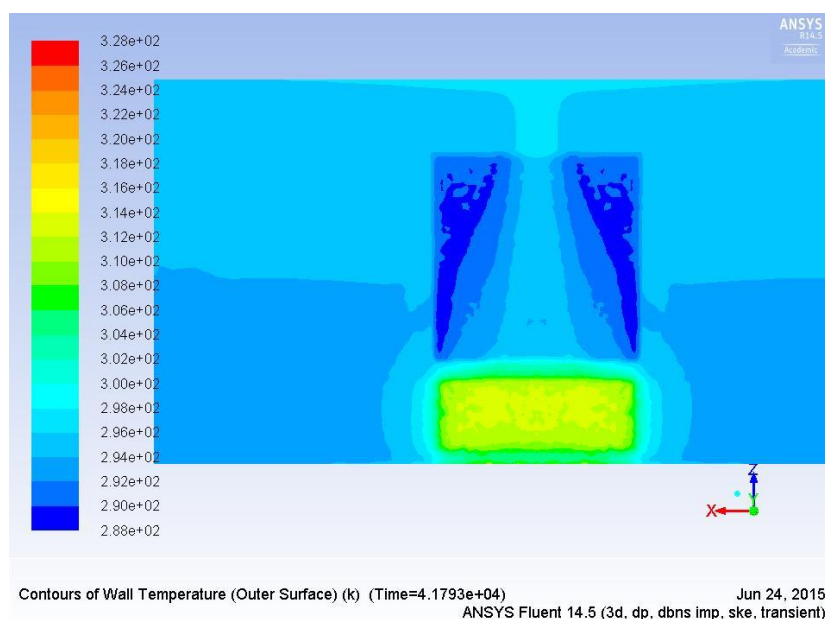


Obrázek 18: Rozložení teploty vzduchu v místnosti pro případ špatných izolačních parametrů okna. Nahoře pro zadní desku chladnou, dole pro zadní desku teplou.

K úsporám energie by podle výrobců mělo dojít především díky snížení teploty stěny za tělesem a nižším teplotním ztrátám prostupem vnější stěnou objektu [2]. Fluent nabízí možnost spočítat střední povrchovou teplotu jednotlivých ploch objektu. Tab. 5 uvádí povrchové teploty zdi a okna. Výsledky potvrzují tvrzení výrobců, že v případě chladnější zadní desky tělesa je obvodová konstrukce chladnější. Střední povrchová teplota stěny je o 2,2 K chladnější v případě použití úsporného tělesa. Teplota okna, ačkoliv je umístěno nad tělesem a není přímo osááno, je o 0,7 K chladnější. V prostoru u zdi vzniká Coandův efekt, kdy se proudící vzduch od tělesa přilne k rovině okna. V případě klasického tělesa je tento efekt intenzivnější, protože je rychlost proudění vyšší vlivem vyšší teploty.

Tab. 5: Povrchové teploty obvodové konstrukce ve °C

		Korado	klasické těleso
t_i	výsledná teplota	21,5	20,6
t_s	přední deska	70,7	70,1
	zadní deska	54,5	70,1
	vnější stěna	25,5	27,7
	okno	18,9	19,3



Obrázek 19: Povrchová teplota stěny v případě chladnější zadní desky, střední povrchová teplota 25,45 °C (nahore) a klasického tělesa, střední povrchová teplota 27,65 °C (dole).

Použijeme-li rovnici (14) a upravíme do tvaru pro dosažení střední povrchové teploty namísto vnitřní teploty vzduchu, získáme tvar:

$$U_{ts,stěna} = \frac{1}{\sum R + R_{se}} = \frac{1}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{1}{\frac{0,4}{0,125} + \frac{1}{25}} = 0,31 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (15)$$

Rozměry vnější stěny jsou 6x3 metry, po odečtení výplně okna je plocha zdi 15,44 m². Můžeme tedy napsat rovnici vedení tepla stěnou a přestup na vnější straně zdi pro oba případy otopného tělesa a jejich rozdílem zjistit potenciál úspor.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{stěna,kl.těleso} &= S \cdot U_{ts,stěna} \cdot (t_{s,kl.těleso} - t_e) \\ \dot{Q}_{stěna,kl.těleso} &= 15,44 \cdot 0,31 \cdot [27,65 - (-12)] = 190 \text{ W} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{stěna,Korado} &= S \cdot U_{ts} \cdot (t_{s,Korado} - t_e) \\ \dot{Q}_{stěna,Korado} &= 15,44 \cdot 0,31 \cdot [25,45 - (-12)] = 179 \text{ W} \end{aligned} \quad (17)$$

Aplikováním stejného postupu na oblast okna získám tok tepla, které projde oknem do venkovního prostoru.

$$U_{ts,okno} = \frac{1}{\frac{s_{okna}}{\lambda_{okna}} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{1}{\frac{0,3}{0,6} + \frac{1}{25}} = 1,85 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{okno,kl.těleso} &= S_{okno} \cdot U_{t,okno} \cdot (t_{so,kl.těleso} - t_e) \\ \dot{Q}_{okno,kl.těleso} &= 2,56 \cdot 1,85 \cdot [19,25 - (-12)] = 148 \text{ W} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{okno,Korado} &= S_{okno} \cdot U_{t,okno} \cdot (t_{so,Korado} - t_e) \\ \dot{Q}_{okno,Korado} &= 2,56 \cdot 1,85 \cdot [18,85 - (-12)] = 146 \text{ W} \end{aligned} \quad (20)$$

V tomto modelovém příkladu jsou ztráty obvodovou konstrukcí pro klasické těleso vyšší o 11 W prostupem zdí a o 2 W prostupem oknem. Pro zjišťování tepelných toků má Fluent vlastní nástroj, jeho výsledky pro oba modely jsou v Tab. 6. Ačkoliv je konvergence reziduí dostatečná, nedošlo ani po modelování $4,2e^{04}$ vteřin simulace k úplnému ustálení energetických toků. Fluent udává výsledky jen v modelované polovině úlohy, výsledky jsou tedy vynásobeny dvěma.

Tab. 6: Tepelné ztráty vypočtené z Fluentu [W]

	Korado	kl. Těleso
vnější stěna	163	164,6
okno	146	147,8

Dále mohu vyhodnotit sálavý výkon jednotlivých ploch v místnosti. Zdroje, sálání přední a zadní deska tělesa, mají kladné znaménko a osálané stěny uvádím se záporným znaménkem. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 7. Strop je ohřátý konvektivními proudy a dále sálá na ostatní stěny.

Podle Tab. 7 sálá přední deska tělesa Korado intenzivněji, celkový podíl sálavé složky však je nižší než u modelu klasického tělesa. Po dosažení výstupů z fluentu do rovnice (9) je podíl sálavé složky u tělesa Korado 35,1 % a u klasického tělesa 41,8 %.

Tab. 7: Radiační výkon [W]

Povrch	Korado	kl. Těleso
zadní stěna	-41,2	-57,8
podlaha	-164,4	-147
vnější stěna	-245,4	-301
přední deska	476	353,8
zadní deska	35	360
boční stěna	-43,6	-52
strop	56,2	28,6
okno	-65,6	-55,6

V následující tabulce (Tab. 8) jsou střední teploty povrchů směřujících do místnosti. Pro simulaci tělesa Korado vychází vyšší teploty povrchů. Výjimkou je již

zmíněná venkovní zeď a okno. Projevila se tak zvýšená teplota čelní desky tělesa. Fluent rovněž spočítá střední teplotu povrchů, jako jejich vážený průměr. Tato teplota bude velmi blízká střední radiační teplotě uprostřed místnosti. Přestože v prvním případě je většina stěn teplejší, nižší teplota venkovní stěny způsobí, že střední radiační teplota obou modelů je stejná. Model počítá i s částí obvodové zdi, jež je kryta tělesem a dopouštíme se tedy vědomé chyby.

Tab. 8: Střední teploty povrchů [°C]

Povrch	Korado	kl. Těleso
zadní stěna	22,4	21,9
podlaha	22,9	22,8
vnější stěna	25,5	27,7
přední deska	70,7	70,0
boční stěna	22,2	21,8
strop	23,0	22,5
okno	18,9	19,3
vážený průměr	26,3	26,3

5. Závěr

Tělesa Kermi a Korado byla připojena k mobilnímu zdroji tepla a termokamerou byla snímána jejich povrchová teplota. Za ustáleného stavu u tělesa Kermi se sériovým zatékáním experiment ukázal, že střední teplota zadní desky je o 4,7 K nižší než teplota předního panelu. Většího teplotního rozdílu 16,2 °C dosáhlo těleso s řízeným zatékáním Korado X-control se zavřenou zadní deskou. V obou případech byla střední teplota čelního panelu o 0,7 K (0,6 K v případě Korada) vyšší než střední teplota vody, kterou bych očekával na běžném otopném tělese s paralelním zatékáním. Podíl konvekce na sdílení tepla do prostoru u tělesa Kermi byl téměř stejný jako u tělesa Korado s otevřenou zadní deskou, tedy tělesa s paralelním zapojením desek. Při zaregulování průtoku otopného tělesa s požadavkem dosažení teplotního rozdílu 20 K byl rozdíl teploty čelní desky a střední teploty vody 3,5 K. Zvýšení teploty čelní desky se projevilo navýšením sálavé složky výkonu o 20 W, ale současně se zvedl i konvektivní výkon, jehož podíl na celkovém výkonu tělesa vzrostl z 61,5 na 63,3 %.

Nejvyšší podíl sálání čelního panelu 22,4 % jsem vypočítal pro těleso Korado se zavřenou zadní deskou. Zároveň má toto těleso nejvyšší podíl konvekce na celkovém výkonu 63,5 %. Navzdory tvrzení výrobce, nedošlo řízeným zatékáním do tělesa k celkovému navýšení sálavé složky.

Rychlost náběhu těles se odvíjí od rychlosti proudění teplotonosné látky a doby, za kterou proteče tělesem. V případě sériového řazení desek je rychlost teplotonosné látky vyšší, ale musí urazit dvounásobnou trasu tělesem oproti paralelnímu zapojení desek. Sériové zapojení nebo uzavření průtoku zadní deskou značně urychlilo náběh čelní desky tělesa. U tělesa Korado s řízeným zatékáním docházelo v případě uzavření průtoku zadní deskou k proudění teplotonosné látky v horní rozvodné komoře od regulačního ventilu k odvzdušňovacímu ventilu. Zadní deska byla pozvolna zahřívána a ustálené teploty dosáhla až po 75 minutách provozu tělesa.

Vytvořil jsem dva stejné modely místnosti s deskovým otopným tělesem typ 20. Do prvního modelu jsem dosadil okrajové podmínky pro povrchovou teplotu přední a zadní desky z výsledků vlastního měření tělesa Korado s uzavřeným průtokem zadní deskou. V druhém modelu, představujícím klasické těleso s paralelním řazením desek, je definována povrchová teplota přední a zadní desky shodně 70 °C.

Ze simulace je zřejmé, že teplota stěny za klasickým tělesem je vyšší, ale rozdíl ve výsledných tepelných ztrátách obvodovou konstrukcí je minimální podle Tab. 6,

přestože jsem uvažoval nejméně vhodné parametry stěny dle ČSN 75 0540. Simulace tak potvrzuje výsledek jiného experimentu popsáném v článku „Energy performance of radiator with parallel and serial connected panels“ [15]. Vliv vyšší radiace čelní desky se odráží ve vyšších povrchových teplotách vnitřních stěn, nejvíce o 0,5 K. Vyhodnocení střední povrchové teploty všech stěn a čelní desky tělesa, tj. střední radiační teploty, vyšlo pro oba modely stejně.

V případě klasického tělesa simulace ukázala intenzivnější proudění vzduchu za tělesem. Vyšší teplota vzduchu způsobuje rychlejší proudění a tím silnější Coandův efekt přilnutí proudu ke stěně. Podle obrazu rozložení vzduchu v místnosti jsou teploty v případě klasického tělesa vyrovnanější.

6. Seznam použité literatury

1. *Směrnice Evropského parlamentu a rady o energetické náročnosti budov. Evropský parlament a rada Evropské Unie.* Brusel : Úřední věstník, 2010. stránky 13,14,.
2. **Korado.** rc.korado.cz. [Online] Korado a.s. [Citace: 12. 4 2015.] www.rc.korado.cz.
3. **Kermi s.r.o.** Kermi therm-x2. [Online] Kermi s.r.o. [Citace: 12. duben 2015.] http://www.kermi.cz/cs/Heiztechnik/Waerme_uebertragen/therm-x2_Flachheizkoerper/index.phtml.
4. **Bašta, J.** *Regulace vytápění.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02582-9.
5. **Kermi.** Kermi prospekty Therm X2 žurnál. <http://www.kermi.cz/cs/Unterlagen/Heiztechnik/Prospekte/index.phtml>. [Online] [Citace: 26. duben 2015.] <http://www.kermi.cz/cs/Unterlagen/Heiztechnik/Prospekte/index.phtml>.
6. **Kermi GmbH.** *Jednořadé nebo víceřadé topné těleso a způsob jeho výroby.* 2158-98 Česká republika, 8. červenec 1998.
7. **Henrad.** Henrad The Radiator. www.henrad.eu. [Online] Henrad. [Citace: 16. duben 2015.] http://www.henrad.eu/henrad_en/overzicht-2/.
8. **Korado a.s.** *Víceřadé otopné těleso s řízeným zatékáním topného média.* 25744 Česká republika, 15. únor 2013. U1.
9. **Matuška, T.** *Experimentální metody v technice prostředí.* Praha : Česká technika-nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03291-4.
10. **Bašta, J.** *Otopné plochy.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2001. 80-01-02365-6.
11. **Kozubková, M.** katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení VSB. [Online] [Citace: 8. červen 2015.] <http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>.
12. **tzb-info.** *tzbinfo.* [Online] [Citace: 8. červen 2015.] <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/38-fyzikalni-hodnoty-pro-suchy-vzduch-pri-tlaku-100-kpa>.
13. **Vymětalík, V.** stavba.tzb-info. *tzbinfo.* [Online] [Citace: 12. červen 2015.] <http://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/127-navrh-obvodove-steny-s-vnejsim-tepeln izolacnim-kompozitnim-systemem>.
14. **stavba.tzb-info.** *tzbinfo.* [Online] [Citace: 2. červen 2015.] <http://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/136-normove-hodnoty-soucinitele-prostupu-tepla-un-20-jednotlivych-konstrukci-dle-csn-73-0540-2-2011-tepelna-ochrana-budov-cast-2-pozadavky>.

15. Maivel M, Konzelmann M, Kurnitski J. REHVA Journal. *REHVA*. [Online] listopad 2014. <http://www.rehva.eu/publications-and-resources/hvac-journal-abstracts/energy-performance-of-radiators-with-parallel-and-serial-connected-panels-abstracts/>.

16. Barták, M. *Řešené příklady z přenosových jevů pro inteligentní budovy*. Praha : ČVUT v Praze, 2010.