



REALIZACE ZAŘÍZENÍ PRO IDENTIFIKACI ROZLOŽENÍ SOUČiniteLE PŘESTUPU TEPLA

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Martin Pelc**
Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Pelc**
Osobní číslo: **S12000656**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**
Název tématu: **Realizace zařízení pro identifikaci rozložení součinitele přestupu tepla**
Zadávací katedra: **Katedra energetických zařízení**

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je návrh, konstrukce a realizace zařízení, které umožní identifikaci rozložení součinitele přestupu tepla na teplosměnné ploše deskového tepelného výměníku.

Práce by měla odpovídat následující struktuře:

1. Rešerše stávajícího stavu znalostí v oboru.
2. Návrh a konstrukce experimentálního zařízení.
3. Sestavení a testování experimentálního zařízení.
4. Návrh algoritmu pro vyhodnocení výsledků.
5. Porovnání výsledků s pracemi jiných autorů, závěry a doporučení.



Rozsah grafických prací: cca 20 stran

Rozsah pracovní zprávy: cca 50 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

[1] LIENHARD, J., H., LIENHARD, J., H., 2005. *Heat Transfer Textbook*. Phlogiston Press, MIT

[2] JENČÍK, J., VOLF, J., 2003. *Technická měření*. Praha: ČVUT.


[3] De WITT, N., 1988. *Theory and Practice of Radiation Thermometry*. New York: John Wiley&Son.

[4] GRUNER, K-G. *Principles of Non-Contact Temperature Measurement*.
<http://www.raytec.com/>


Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání diplomové práce: 25. února 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 26. května 2016


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 25. února 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 15.5.2015

Podpis:



Anotace

Diplomová práce se zabývá identifikací rozložení součinitele přestupu tepla na desce rekuperačního výměníku. Teoretická část diplomové je zaměřena na principy přenosu tepla, především pak přenosu tepla prouděním. Dále jsou v teoretické části popsány principy termografie a použití termokamery. V Experimentální části jsou popsána jednotlivá zařízení použitá v experimentu a také samotné sestavení experimentálního zařízení. Poslední kapitola se zabývá měřeními dat a jejich vyhodnocením.

Klíčová slova

Přenos tepla, součinitel přestupu tepla, termočlánek, termokamera, tepelný výměník.

Annotation

Diploma thesis is dealing with identification of heat transfer coefficient on the plate of recuperation heat exchanger. Theoretical part of diploma thesis is focused on the principles of heat transfer, especially on the convection. Laws of thermography and using of thermocamera are further described in theoretical part. In the experimental part is described technique which is used in experimental equipment. Information about assembling of experimental equipment are mentioned also in this part. Last part of diploma thesis is about measuring of data and about their evaluation.

Keywords

Heat transfer, heat transfer coefficient, thermocouple, thermocamera, heat exchanger.

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mi pomáhali a podporovali mě při tvorbě mé diplomové práce. Především chci poděkovat panu doc. Ing. Tomáši Vítovi, Ph.D. za všestrannou pomoc, cenné rady a připomínky, týkající se zpracování a obsahu diplomové práce.

Obsah

1	Úvod	12
2	Teoretická část	13
2.1	Přenos tepla vedením.....	13
2.2	Přenos tepla prouděním	13
2.3	Přenos tepla zářením	14
2.4	Přestup tepla při volné konvekci.....	14
2.5	Přestup tepla při nucené konvekci.....	16
2.6	Součinitel přestupu tepla	17
2.7	Příklady metod pro určení součinitele přestupu tepla	18
2.8	Termokamera a termografie.....	22
3	Experiment.....	30
3.1	Sestavení experimentálního zařízení	31
3.2	Měření hmotnostního toku obtékajícího vzduchu.....	42
3.3	Určení tepelného výkonu zářiče.....	44
3.4	Kalibrace termokamery	45
4	Měření dat	51
5	Vyhodnocení naměřených dat.....	64
5.1	První algoritmus pro vyhodnocení naměřených dat.....	64
5.2	Druhý algoritmus pro vyhodnocení naměřených dat	68
6	Závěr.....	81
7	Použité zdroje.....	83
7.1	Seznam literatury	83
7.2	Internetové zdroje.....	84

Seznam obrázků

Obrázek 1: Alfometr HFS-3[35]	18
Obrázek 2: Spektrum vlnových délek a jejich frekvencí [19]	23
Obrázek 3: Struktura mikrolometru [24]	24
Obrázek 4:Kruhový mikrolometr [23].....	24
Obrázek 5: Zjednodušené schéma konstrukce termokamery [20]	25
Obrázek 6: Schéma experimentálního zařízení.....	31
Obrázek 7: Rám rekuperačního výměníku včetně vložených desek a termočlánků	32
Obrázek 8: Výroba a zabudování příruby pro přívod vzduchu do výměníku	32
Obrázek 9: Zapojení autotrafu pro regulaci zářiče a ventilátoru	33
Obrázek 10: Analyzátor Dewetron a zapojení termočlánků do sběrného slotu.....	33
Obrázek 11: Finální podoba experimentálního zařízení.....	34
Obrázek 12: Laboratorní termokamera VarioCam [31]	35
Obrázek 13: Analyzátor DEWE-5000 použitý v experimentu [25]	36
Obrázek 14. Vrtulková sonda Testo 416 [27].....	37
Obrázek 15: Drátková sonda Testo 425 [26]	37
Obrázek 16: Vrtulková sonda Testo 452	37
Obrázek 17: Příklad termočlánku včetně standardizované koncovky [28]	38
Obrázek 18: Keramický zářič Elstein FSR 1000 [29].....	39
Obrázek 19: Autotrafo Diametral RA1F250.100 [30]	39
Obrázek 20: Wattmetr HM 8115-2, Hameg [34].....	39
Obrázek 21: Kalibrační pec s vloženými termočlánky.....	40
Obrázek 22: Zařízení pro měření na ventilátoru	42
Obrázek 23: Rozložení termočlánků a měřicích míst na desce výměníku	46
Obrázek 24: Rozložení teplotního pole při kalibračním ohřevu	48
Obrázek 25: Rozložení teplotního pole při kalibračním chlazení.....	50
Obrázek 26:Termogram režimu 100% ohřev, 100% chlazení.....	67
Obrázek 27: Schéma tepelné bilance na desce výměníku	72
Obrázek 28: Rozložení součinitele přestupu tepla pro režim 100% ohřev, 100% chlazení.	74

Seznam grafů

Graf 1: Výsledky součinitele přestupu tepla jednotlivých metod měření [10]:	21
Graf 2: Závislost spektrální hustoty zářivého toku na vlnové délce záření [18].....	26
Graf 3: Grafické znázornění Wienova posunovacího zákona [18]	27
Graf 4: Znázornění hustoty zářivého toku tělesa při teplotě 800K [18].....	28
Graf 5: Porovnání teplot termočlánků a teploty kalibrační pece	41
Graf 6: Závislost rychlosti vzduchu na poloze potenciometru autotrafa.....	43
Graf 7: Závislost příkonu zářiče na poloze potenciometru autotrafa	45
Graf 8: Průběh teplot měřených termočlánky (ohřev).....	47
Graf 9: Průběh teplot měřených termokamerou (ohřev)	47
Graf 10: Průběh teplot měřených termočlánky (chlazení).....	49
Graf 11: Průběh teplot měřených termokamerou (chlazení)	49

Seznam tabulek

Tabulka 1: Teploty naměřené při kalibraci termočlánků.....	41
Tabulka 2: Změřené a vypočtené parametry pro ventilátor.....	43
Tabulka 3: Změřené a vypočtené parametry pro keramický zářič	44
Tabulka 4: Příklad matice teplot, 100% ohřev 0% chlazení (matice A)	65
Tabulka 5: Příklad matice teplot, 100% ohřev 100% chlazení (matice B).....	66
Tabulka 6: Příklad matice C, 100% ohřev, 100% chlazení	66
Tabulka 7: Matice rozložení součinitele přestupu tepla.....	67

Seznam použitých veličin a jednotek

a	($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	součinitel teplotní vodivosti
c	($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	rychlost
c_p	($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}$)	izobarická měrná tepelná kapacita
D_c	($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	součinitel molekulární difuze
f	(Hz)	frekvence
g	($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	gravitační zrychlení
h	($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	rychlost sublimace
I	($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$)	intenzita záření tělesa
j	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	hustota hmotnostního toku
$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$	($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$)	Boltzmannova konstanta
L_{char}	(m)	charakteristický rozměr
P	(W)	výkon
P_r	(W)	příkon
\dot{q}	($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	plošná hustota tepelného toku
Q	(W)	tepelný tok
Q_{el}	(W)	teplo dodané elektrickým ohřevem
Q_{rad}	(W)	teplo dodané/odvedené radiací
Q_{kond}	(W)	teplo dodané/odvedené kondukcí
r	($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	měrná plynová konstanta
T	(K)	termodynamická teplota
t_s	($^{\circ}\text{C}$)	teplota stěny
t_t	($^{\circ}\text{C}$)	teplota tekutiny
t_t^{\wedge}	($^{\circ}\text{C}$)	počáteční teplota tekutiny
$t_t^{\wedge\wedge}$	($^{\circ}\text{C}$)	koncová teplota tekutiny
t_{∞}	($^{\circ}\text{C}$)	teplota neovlivněné oblasti
t_{str}	($^{\circ}\text{C}$)	střední teplota desky

Seznam použitých veličin a jednotek (Řecká abeceda)

α	$(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	součinitel přestupu tepla
$\sigma = 5,67\cdot 10^{-8}$	$(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4})$	Stefan-Boltzmanova konstanta
ρ	$(\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3})$	hustota
μ	$(\text{Pa}\cdot\text{s})$	dynamická viskozita
η	$(\%)$	účinnost
ν	$(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	kinematická viskozita
λ	$(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	součinitel tepelné vodivosti
ε	(1)	emisivita
β	$(1\cdot\text{K}^{-1})$	součinitel objemové roztažnosti

Definice bezrozměrných čísel

Nu	$Nu = \frac{\alpha \cdot L_{char}}{\lambda} \quad (1)$	Nusseltovo číslo
Pr	$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda} \quad (1)$ $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	Prandtlovo číslo
Gr	$Gr = \frac{g \cdot L_{char}^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2} \quad (1)$	Grashofovo číslo
Re	$Re = \frac{c \cdot L_{char}}{\nu} \quad (1)$	Reynoldsovo číslo
Sc	$Sc = \frac{\nu}{D_c} \quad (1)$	Schmidtovo číslo
Sh	$Sh = \frac{f \cdot L_{char}}{c} \quad (1)$	Strouhalovo číslo

1 Úvod

Rekuperace, neboli zpětné získávání tepla, je technologie založená na využívání odpadního tepla. Velmi hojně se rekuperace využívá při stavbě nízkoenergetických popř. pasivních domů, kde je technologie zpětného získávání tepla nezbytná. Při rekuperaci je teplý odpadní vzduch z místnosti využíván pro ohřev chladnějšího čerstvého vzduchu. Teplo se předává prostřednictvím rekuperačního výměníku. V této práci byl použit deskový výměník z hliníkových desek. K přenosu tepla dochází vlivem rozdílných teplot média na vnitřní a vnější straně desky. Zásadním parametrem k popisu intenzity tohoto přenosu je součinitel přestupu tepla. Velikost tepelného toku mezi stěnou a obtékající tekutinou určuje především teplotní rozdíl, velikost a provedení teplosměnných ploch a součinitel přestupu tepla. Součinitel přestupu tepla má vliv na celkovou účinnost popř. výkon výměníku a je tedy důležitou veličinou pro jeho návrh.

Tato práce se zabývá experimentálním určením rozložení součinitele přestupu tepla na ploše deskového výměníku. Pro experiment byla použita část rekuperačního výměníku o rozměrech 24 x 16 cm. Cílem práce bylo určit rozložení součinitele přestupu tepla na desce, při jednotlivých režimech experimentálního zařízení. Jedním z důvodů pro stavbu tohoto experimentu bylo umožnění porovnání dat vypočtených pomocí numerických metod. Experimentální zařízení bylo sestaveno tak, aby umožnilo měřit další důležité veličiny, jako jsou teplota a rychlost vzduchu, příkony jednotlivých elektrických zařízení atd. Experimentální zařízení je tedy možné použít i pro další měření.

V následujícím textu je popsána základní teorie potřebná k provedení experimentu a vyhodnocení naměřených dat. Především se jedná o základní principy přenosu tepla a termografie. V další části jsou popsána jednotlivá zařízení použitá v experimentu a také samotné sestavení experimentálního zařízení. Poslední kapitola se zabývá měřením dat a jejich vyhodnocením.

2 Teoretická část

Přenos tepla mezi tekutinou (plynem, kapalinou, parou) a stěnou může být realizován třemi různými pochody. Vedením tepla (kondukcí), prouděním tepla (konvekcí) a sáláním tepla (radiací). V přírodě se však přenos tepla uskutečňuje nejčastěji kombinací všech tří jevů. Ne vždy se však jednotlivé jevy podílí na procesu přenosu tepla stejnou měrou. Například přenos tepla radiací má obvykle větší význam při vyšších teplotách, přenos tepla konvekcí je významnější za vyšších rychlostí proudění tekutiny. Tyto a další podklady vedou k tomu, že při výpočtech přestupu tepla lze procesy zjednodušit na jednotlivé případy přenosu tepla popř. na kombinaci 2 nejvýznamnějších. Pro řešení přestupu tepla, tedy pro přenos tepla mezi tekutinou a stěnu se nejčastěji jako dominantní proces uvažuje konvekce.[1, 2]

2.1 Přenos tepla vedením

Vedení tepla je proces, který probíhá v prostředí, jehož částice se nepohybují ve směru tepelného toku. Jedná se o přenos tepla způsobený mikropohybem elementárních částic (atomů, molekul, iontů). Je to kontaktní způsob přenosu tepla. Kinetická energie částic je přímo úměrná teplotě a tedy čím vyšší mají částice energii, tím více kmitají. K přenosu tepla vedením nedochází ve vakuu. Nezbytnou podmínkou vedení tepla je existence teplotního spádu. [1, 2]

Kondukcce tepla se řídí tzv. Fourierovým zákonem vedení tepla

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad}T , \quad (2.1)$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti dané látky.

2.2 Přenos tepla prouděním

Proudění je přenos tepla z povrchu tuhého tělesa do okolní tekutiny nebo opačně. Přenos tepelné energie je zajišťován makropohybem částic tekutiny. Nutnou podmínkou konvekce je proudění tekutiny a přítomnost teplotního spádu. Pokud tekutina neproudí, tak nedochází ke konvekci. Při proudění tekutiny podél stěny tělesa vzniká tzv. mezní vrstva.

Tepelný tok je kolmý k laminární části této mezní vrstvy a skrz ni se teplo šíří převážně vedením. Přenos tepla prouděním je tedy vždy spojen s přenosem tepla vedením. Z hlediska intenzity přenosu tepla funguje laminární podvrstva mezní vrstvy jako tepelný izolant.

V určitých jednodušších případech lze podíl přenosu tepla vedením zanedbat. Většina případů však toto zjednodušení neumožňuje a je tedy potřeba řešit přestup tepla jako tzv. sdruženou úlohu. Není však možné řešit mechanismy přestupu tepla odděleně. Je potřeba přistoupit k řešení přestupu tepla jako ke komplexní úloze. Pravděpodobně nejjednodušší řešení takovéto úlohy je pomocí teorie podobnosti, možné je ovšem také řešení pomocí soustavy diferenciálních rovnic. Pro složitější případy je výpočet pomocí soustavy diferenciálních rovnic velmi náročný.

K přenosu tepla prouděním nedochází mezi tuhými tělesy a ve vakuu. Z fyzikálního hlediska rozlišujeme dva základní způsoby přenosu tepla prouděním. Přenos tepla při volném proudění (volná konvekce) a přenos tepla nuceným prouděním (nucená konvekce). [1, 2, 4]

Přenos tepla konvekcí je popsán Newtonovým zákonem přenosu tepla

$$\dot{q} = \alpha \cdot (t_s - t_r), \quad (2.2)$$

kde α je součinitel přestupu tepla mezi tekutinou a stěnou.

2.3 Přenos tepla zářením

Jedná se o přenos tepelné energie mezi dvěma tělesy ve formě elektromagnetického vlnění. Elektromagnetické vlnění dopadá na povrch tělesa, kde se následně transformuje na tepelnou energii. Každé těleso vyzařuje část své vnitřní energie do okolí. Čím vyšší je teplota tělesa, tím vyšší je intenzita záření. Nejčastěji se jedná o záření infračervené. Tělesa však vyzařují v celém spektru. K přenosu tepla radiací může docházet pouze v průteplivém prostředí. [1, 2]

Intenzitu záření tělesa lze popsat Stefan-Boltzmannovo zákonem

$$I = \sigma \cdot T^4, \quad (2.3)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}\text{)}$.

2.4 Přestup tepla při volné konvekcí

Jelikož je předmětem této práce zkoumání přestupu tepla mezi vzduchem a deskou rekuperačního výměníku, zabývá se práce podrobněji pouze přenosem tepla konvekcí.

Volná konvekce je případ přestupu tepla, u něhož není proudění způsobeno vnějšími silami. Hnací mechanismem pak může být např. rozdíl hustot teplejších a chladnějších částic tekutiny. Při ohřívání tekutiny stoupají teplejší částice vzhůru a na jejich místo se dostávají částice chladnější, tím dochází k proudění, tzv. volné konvekcí.

Intenzita proudění je závislá především na rozdílu hustot teplých a studených částic tekutiny. Čím vyšší je tento rozdíl, tím intenzivnější bude pohyb tekutiny.

V praxi rozlišujeme dva základní typy samovolného proudění. Laminární proudění a turbulentní proudění. O tom, jaký typ proudění nastane, rozhoduje velikost teplotního spádu Δt mezi teplotou obtékané stěny t_s a teplotou obtékající tekutiny t_t . Dalším důležitým parametrem jsou rozměry obtékaného tělesa. [3, 4]

Při proudění tekutiny podél svislé stěny závisí součinitel přestupu tepla na charakteru proudění. V oblasti laminárního proudění součinitel α postupně klesá až do přechodové oblasti, kde se laminární proudění mění na turbulentní. V přechodové oblasti je hodnota součinitele značně proměnlivá. V oblasti turbulentního proudění je však hodnota téměř konstantní. Toto ustálení je způsobeno ustálením laminární podvrstvy turbulentní mezní vrstvy, která funguje jako tepelný odpor.

Jak již bylo řečeno, pro určení součinitele přestupu tepla existují dva postupy. Řešení soustav diferenciálních rovnic a tzv. teorie podobnosti, která je založena na bezrozměrných podobnostních číslech.

Pomocí teorie podobnosti lze součinitel přestupu tepla α zjistit z definice Nusseltova čísla

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L_{char}}{\lambda} \Rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L_{char}}, \quad (2.4.1)$$

kde L_{char} je charakteristický rozměr obtékaného tělesa.

Jelikož se látkové vlastnosti tekutiny mění s teplotou a v tekutině tím vzniká teplotní pole, je potřeba zavést tzv. charakteristickou teplotu

$$t_{char} = \frac{t_s - t_t}{2}, \quad (2.4.2)$$

kde t_s je teplota obtékaného tělesa a t_t je teplota tekutiny.

Tato teplota se v dalším výpočtu uvažuje jako střední teplota mezní vrstvy, přes kterou probíhá přestup tepla. Všechny látkové vlastnosti tekutiny se uvažují právě při charakteristické teplotě.

Nusseltovo číslo lze vyjádřit také v tzv. mocninovém tvaru v závislosti na Grashofovu a Prandtlovu číslu

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n, \quad (2.4.3)$$

kde n je index odpovídající konkrétním případům proudění. Z průběhu funkce $Nu = f(Gr \cdot Pr)$ pak plynou hodnoty c a n pro jednotlivé intervaly $(Gr \cdot Pr)$.

Rovnice tvaru $Nu=c \cdot (Gr \cdot Pr)^n$ platí pro libovolné kapaliny a plyny a pro tělesa libovolného tvaru a rozměru. Pokud se použije rovnice (2.4.1) pro výpočet součinitele přestupu tepla u vodorovné desky, bere se jako charakteristický rozměr kratší strana desky. [4, 7, 8]

2.5 Přestup tepla při nucené konvekci

Nucenou konvekci je případ proudění, které vzniká působením vnějších sil. To může být způsobeno např. čerpadlem nebo ventilátorem. Podmínky nucené konvekce závisí na typu proudící tekutiny a na jejích vlastnostech. Dále na teplotě tekutiny a rychlosti tekutiny, na tvaru a rozměrech protékaného kanálu popř. obtékaného tělesa. Nucené proudění podél obtékaných stěn může být laminární nebo turbulentní.

O tom, jaké proudění nastane, rozhoduje především hodnota Reynoldsova čísla Re a tvar obtékaného tělesa. Druh proudění má značný vliv na přestup tepla. Při laminárním proudění má přenos tepla vedením významnější roli než při proudění turbulentním. Při laminárním proudění je důležitá také tepelná vodivost tekutiny.

K přestupu tepla při nucené konvekci může docházet v mnoha případech, jako je např. proudění v potrubí, proudění v kanálech a štěrbinách, obtékaní svazku trubek.

Pozornost je v této práci věnovaná pouze nucenému proudění tekutiny podél rovinné desky, popř. proudění tekutiny mezi dvěma deskami.

Při proudění tekutiny mezi dvěma deskami závisí charakter rychlostního profilu tekutiny na charakteru proudění. Při proudění laminárním vzniká tzv. laminární rychlostní profil. Pomyslný řez laminárním rychlostním profilem má parabolický tvar. Ten je způsoben vazkými silami tekutiny, které třením na deskách a vnitřním třením v tekutině zpomalují okraje proudění. Při proudění turbulentním vzniká tzv. turbulentní rychlostní profil. Ten je však tvarově daleko složitější než profil laminární. V obou případech tvar rychlostního profilu nezávisí jen na rychlosti. Důležitými parametry jsou také hydrodynamická drsnost, resp. hladkost, obtékaných desek a teplotní podmínky. Pokud například bude tekutina během proudění zahřívána popř. ochlazována od desek, tvar rychlostního profilu se tím změní.

Při nucené konvekci závisí Nusseltovo číslo na Reynoldsově a Prandtlově číslu. V mocninovém tvaru lze velikost Nusseltova čísla vyjádřit ve tvaru

$$Nu=c \cdot (Re^n \cdot Pr^m), \quad (2.5.1)$$

kde n a m jsou indexy odpovídající konkrétním případům proudění. Tato rovnice opět platí pro všechny případy nucené konvekce.

Součinitel přestupu tepla podél rovinné stěny při laminárním proudění lze stanovit z rovnice

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = \frac{\alpha \cdot L_{char}}{\lambda}. \quad (2.5.2)$$

Hodnotu Reynoldsova čísla určíme ze vztahu

$$Re = \frac{c \cdot L_{char}}{\nu}, \quad (2.5.3)$$

kde ν je kinematická viskozita proudící tekutiny.

Fyzikální veličiny je opět potřeba dosadit pro charakteristickou teplotu a tekutiny

$$t_{char} = \frac{1}{2} \cdot \left(t_s + \frac{t_t' + t_t''}{2} \right). \quad (2.5.4)$$

Při turbulentním proudění tekutiny podél stěny, stanovíme součinitel přestupu tepla z rovnice

$$Nu = 0,057 \cdot Re^{0,78} \cdot Pr^{0,78} = \frac{\alpha \cdot L_{char}}{\lambda}. \quad (2.5.5)$$

Reynoldsovo číslo i střední teplotu stěny určíme ze stejných vztahů, jako při proudění laminárním.

Výsledky těchto výpočtů jsou dostačující pro běžnou praxi a návrh tepelných zařízení. Pro přesnější výsledky lze využít měřicí techniku, jako je například drátková anemometrie, alfametr a termokamera. Z naměřených dat lze dopočítat součinitel přestupu tepla s velmi dobrou přesností. [3, 4, 5, 7]

2.6 Součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla je rozhodující veličinou při řešení přestupu tepla. Velikostí tohoto součinitele se určují podmínky přestupu tepla z tekutiny na pevnou stěnu popř. naopak. Z Newtonova zákona plyne rozměr součinitele α ($W/m^2 \cdot K$). Součinitel α je závislý na mnoha parametrech. Pro správné určení jeho hodnoty je třeba znát fyzikální vlastnosti obtékající tekutiny a informace o pohybu tekutiny. Důležitou roli hraje také tvar obtékaného tělesa a jeho povrch. Naopak součinitel přestupu tepla nezávisí na materiálu stěn, ze kterého teplo přestupuje do obtékající tekutiny. [3, 4]

Všechny obtíže ohledně výpočtu vlastností kapaliny, charakteru přestupu tepla a hydrodynamických jevů, se soustřeďují na určení velikosti součinitele α .

V praxi se vyskytující případy přestupu tepla lze rozdělit podle toho, zda probíhají za podmínek volné konvekce, nebo za podmínek nucené konvekce.

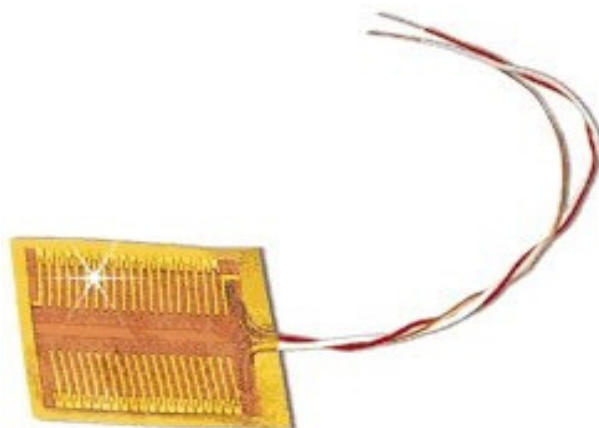
2.7 Příklady metod pro určení součinitele přestupu tepla

Jak již bylo uvedeno, součinitel přestupu tepla α , je velmi komplexní veličina závislá na mnoha parametrech. Závisí v podstatě na vlastnostech a charakteru proudového pole a na geometrickém uspořádání daného případu, kde je součinitel přestupu sledován. V našem případě se jedná o obtékání tenké desky rekuperačního výměníku nuceným proudem vzduchu.

Jednou z metod, jak určit součinitel přestupu tepla, je naměřit během experimentu hodnoty těch veličin, které se zásadně podílejí na výsledné hodnotě součinitele. Tyto naměřené hodnoty se dosadí do výše uvedených vzorců pro volnou popř. nucenou konvekci. Takto vypočtený součinitel přestupu tepla může být nepřesný, především vlivem měřicí chyby jednotlivých přístrojů a použitím vztahů z teorie podobnosti.

Chceme-li dosáhnout přesnějších výsledků, je potřeba postavit experiment tak, aby bylo možné součinitel přestupu tepla zjistit například jen z naměřeného tepelného toku. Pravděpodobně nejpoužívanějším způsobem měření lokálních hodnot tepelného toku, resp. součinitele přestupu tepla, je tzv. alfametr. Příkladem těchto snímačů je tenkovrstvý snímač tepelného toku HFS-3. Tento snímač lze využít pro určování tepelných vlastností materiálu, měření tepelného toku, popř. pro měření přenosu tepla. Alfametr funguje na principu diferenciálních termočlánků.

Existuje mnoho metod pro měření součinitele přestupu tepla. V následujícím textu uvádím příklady zjišťování součinitele přestupu tepla od jiných autorů. Jedná se o metody založené na různých fyzikálních nebo chemických jevech.



Obrázek 1: Alfametr HFS-3[35]

2.7.1 Metoda vyhodnocení lokálních hodnot součinitele přestupu tepla

Experiment je založen na Newtonově zákoně přestupu tepla $\dot{q} = \alpha \cdot (t_s - t_t)$ a lze ho provádět dvěma způsoby za rozdílných předpokladů.

První způsob předpokládá, že hodnota tepelného toku a teplota neovlivněné oblasti jsou konstantní, tedy $\dot{q} = konst$, $t_\infty = konst$.

Hodnotu konstantního tepelného toku je zajištěna elektrickým ohřevem obtékané stěny např. tenkou topnou folií. Tepelný tok je pak vyhodnocen pomocí celkového tepelného toku se zohledněním ztrát

$$\dot{q} = \frac{Q_{el} - Q_{rad} - Q_{kond}}{S}. \quad (2.7.1)$$

Pro určení součinitele přestupu tepla zbývá experimentálně určit rozložení teploty na stěně resp. na rozhraní mezi stěnou a tekutinou. Rozložení této teploty lze určit např. pomocí tekutých krystalů nebo termokamerou. [9, 10]

Druhý způsob je založen na předpokladu, že obě teploty t_s a t_∞ jsou konstantní, tedy $t_s = konst$, $t_\infty = konst$. Pro dosažení konstantního rozložení teploty na stěně, resp. na rozhraní mezi stěnou a tekutinou, lze využít robustní ohřívací desku nebo kapalinový ohřev. Pro určení součinitele přestupu tepla je potřeba experimentálně zjistit hodnotu tepelného toku. Ten je možné změřit například termokamerou nebo pomocí snímače hustoty tepelného toku. [9, 10]

V následujícím textu jsou použity výsledky experimentu [10] porovnávajícího oba způsoby měření. V případě předpokladu konstantní teploty stěny, byla stěna připojena na cirkulační oběh vody. Tento oběh temperoval teplotu stěny pomocí 3 mm široké štěrbin, kterou byla voda cirkulována na teplotu 45°C. Maximální rozdíl mezi teplotou vody vstupující do štěrbin a teplotou vody vystupující ze štěrbin byl 0,2°C. Měřená strana obtékané desky byla natřena černou barvou pro zajištění vysoké emisivity.

K měření rozložení teploty byla použita termokamera. Výsledkem měření bylo, že na osmdesáti procentech měřeného povrchu je teplota s maximální odchylkou 0,4°C. Pro experiment lze tedy tuto oblast považovat za izotermickou.

Lokální hodnoty pro součinitel přestupu tepla lze získat pomocí vztahu

$$\alpha = \frac{-\lambda \cdot (\partial T / \partial y)}{t_s - t_t}, \quad (2.7.2)$$

kde teplotní gradient tekutiny obtékající stěnu $(\partial T / \partial y)$ byl měřen pomocí termočlánků.

Vzdálenost termočlánku od obtékané stěny byla stanovena odhadem na hodnotu 0,5 mm od obtékané stěny. Chyba této metody byla vypočtena na 11%

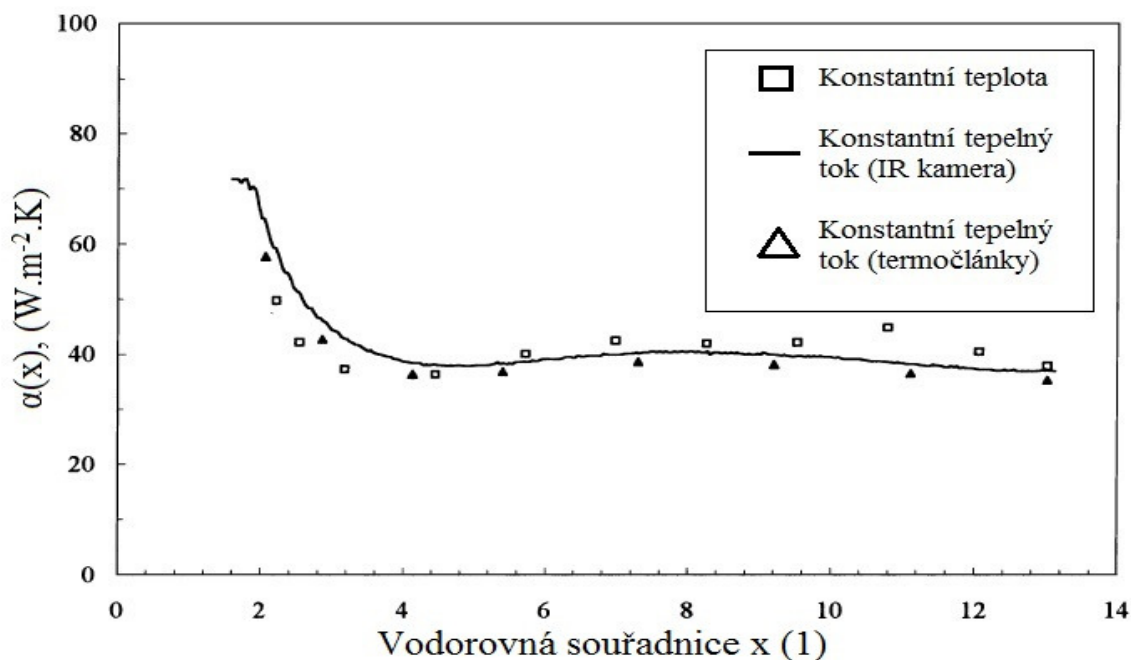
V druhém případě byl konstantní tepelný tok stěnou zajištěn 1,1 mm tenkou skleněnou deskou. Na jednu stěnu této desky byla nanášena vrstva oxidu india. Elektrický odpor této vrstvy byl takový, aby elektrický odpor skleněné desky byl $75 \pm 0,2 \text{ } (\Omega \cdot \text{m}^{-2})$. Do experimentálního zařízení byly vloženy dvě skleněné desky mezi kterými byla sklolaminátová izolace. Exponovaná strana skleněné desky byla natřena černou barvou a rozložení teploty bylo měřeno pomocí termokamery. Součinitel přestupu tepla lze pak stanovit pomocí vztahu

$$\alpha = \frac{Q_{el} - Q_{rad} - Q_{kond}}{S \cdot (t_s - t_t)}, \quad (2.7.3)$$

kde Q_{el} je teplo vložené do systému pomocí elektrického ohřevu $1050 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Tato hodnota byla zvolena z důvodu zachování průměrné teploty stěny 45°C , podobně jako tomu bylo u předchozího případu. Teplo odvedené radiací a konvekcí pak bylo stanoveno na 11% z celkového dodaného tepla. Teplo odvedené vedením bylo zanedbáno.

Teplota stěny byla měřena termokamerou a pro kontrolu dat také termočlánky umístěnými na skleněné desce. Chyba této metody byla vypočtena na 6%.

Na následujícím grafu jsou znázorněny naměřené hodnoty součinitele přestupu tepla naměřeného jednotlivými metodami. [9, 10]



Graf 1: Výsledky součinitele přestupu tepla jednotlivých metod měření [10]:

2.7.2 Analogie mezi přestupem tepla a přenosem hmoty

Jedná se o tzv. metodu sublimace naftalenu, kdy je za daných podmínek sledovaná vrstva odsublímaného naftalenu, který je nanesen na měřenou plochu. Naftalen ($C_{10}H_6$) je aromatický uhlovodík mající dvě benzenová jádra. [9]

Informace o přestupu tepla získáme jednou z výše uvedených metod $\dot{q} = konst$, $t_\infty = konst$ nebo $t_s = konst$, $t_\infty = konst$.

Pomocí sublimace naftalenu zjistíme informace o přenosu hmoty vypočtením hustoty hmotnostního toku ze vztahu

$$j_N = h_m \cdot \left(\frac{p_{Nsat}}{r_N \cdot T_s} - \frac{p_{N,\infty}}{r_N \cdot T_\infty} \right), \quad (2.7.4)$$

kde j_N hustota hmotnostního toku naftalenu ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$),

h_m rychlost sublimace naftalenu ($m \cdot s^{-1}$),

r_N plynová konstanta naftalenu ($64,87 J \cdot kg^{-1} K^{-1}$),

p_{Nsat} tlak nasycených par naftalenu (Pa).

Pro $p_{N, \infty} = 0$ platí

$$h_m = \frac{\rho_N \cdot r_N \cdot T_s \cdot \Delta z(x)}{p_{Nsat} \cdot \Delta t}, \quad (2.7.5)$$

kde p_N je hustota tuhého naftalenu pro 20°C (1175 kg.m⁻³),

$\Delta z(x)$ odsublimovaná vrstva (0,03 mm - 0,1 mm) ,

Δt čas expozice (15 min - 120 min).

Z naměřených a vypočtených hodnot lze vypočítat hodnotu Schmidtova podobnostního čísla Sc a Strouhalova podobnostního čísla Sh . Analogie mezi přestupem tepla a přenosem hmoty je pak daná vztahem

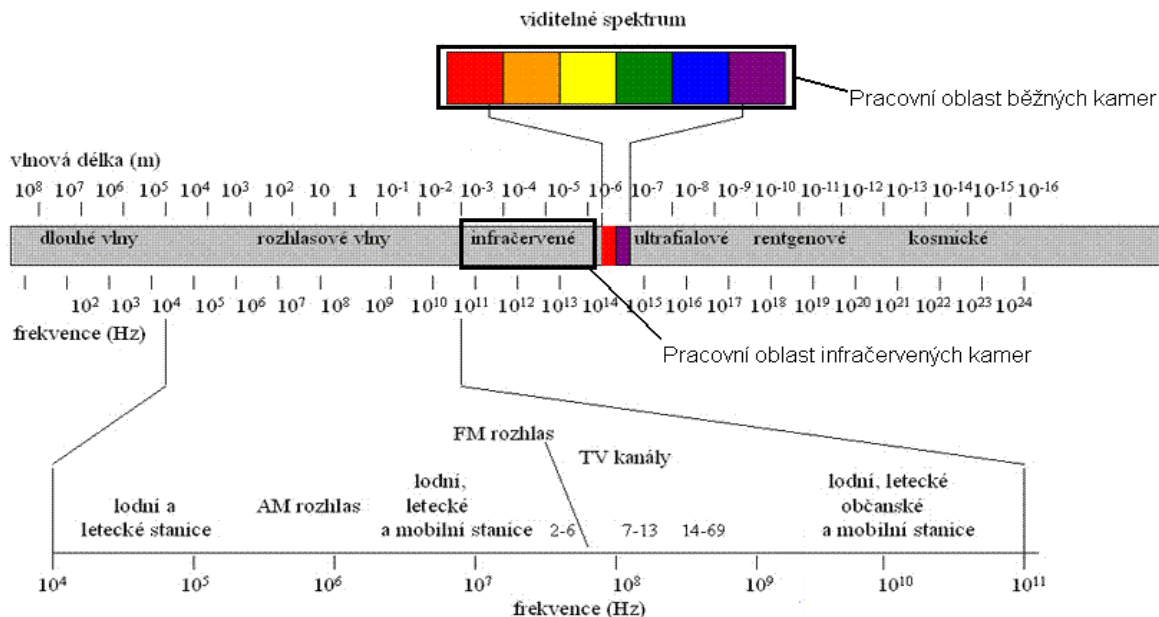
$$\frac{Nu}{Pr^n} = \frac{S_h}{Sc^n}. \quad (2.7.6)$$

2.8 Termokamera a termografie

Pro realizaci experimentu a vyhodnocení naměřených dat bylo potřeba zařadit do experimentu některá měřicí, pracovní, popř. regulační zařízení. Jednoznačně nejdůležitější částí celého experimentálního zařízení je termokamera. Pomocí kamery je snímána povrchová teplota desky rekuperačního výměníku. Jelikož je termokamera zásadním a pravděpodobně nejsložitějším článkem experimentu, zaměřil jsem se v následujícím textu na přiblížení základní funkce a principů probíhajících uvnitř termokamery a na základní teorii termografie.

2.8.1 Úvod do termografie

Infračervené tzv. termografické kamery se odlišují od běžných kamer především v tom, jaké spektrum vlnových délek může kamera snímat. Rozsah snímaných vlnových délek je označován jako spektrální citlivost kamery. Běžné kamery pracují v pásmu viditelných vlnových délek $\lambda = 0,4 - 0,75 \mu\text{m}$. Oproti tomu většina infračervených kamer pracuje v pásmu pro člověka neviditelných vlnových délek $\lambda = 0,9 - 14 \mu\text{m}$. Jedná se tedy o infračervené záření. Na Obr. 2 je znázorněno spektrum vlnových délek a frekvencí jednotlivých druhů vlnění (záření) od kosmického záření až po dlouhé vlny. Na obrázku jsou také vyznačené pracovní oblasti obou druhů kamer. [20, 21]



Obrázek 2: Spektrum vlnových délek a jejich frekvencí [19]

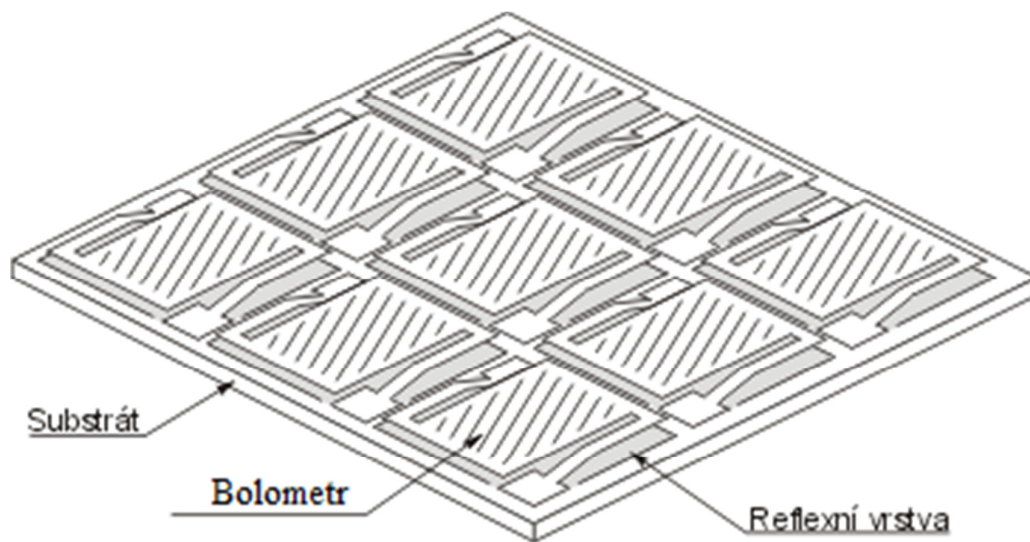
2.8.2 Konstrukce a funkce termokamery

Termokamera dokáže infračervené záření zachytit a pomocí vnitřního algoritmu jej převést na barevný obraz. Při měření termokamerou dopadají elektromagnetické vlny vyzařované tělesem na optiku kamery. Záření je dále optickou soustavou (může být i pouze jedna čočka) usměrňováno na detektor. V dnešní době se nejčastěji využívají čočky z germania kvůli jeho optickým vlastnostem. Pro minimalizaci odrazu záření je na čočce nanášena antireflexní vrstva. Tím lze dosáhnout propustnosti čočky až 90%. Detektor převádí dopadající infračervené záření na elektrický signál, který je následně zpracován do tzv. termogramu.

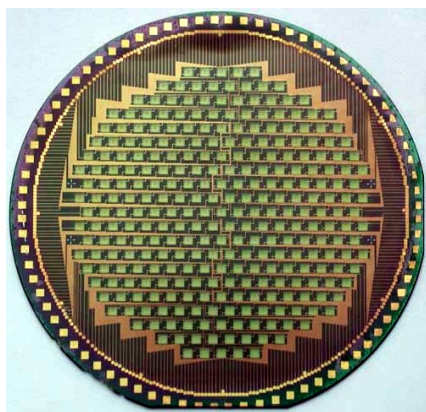
Podle funkce rozlišujeme dva základní typy detektorů a to detektory tepelné a fotonové. Tepelné detektory jsou dnes nejpoužívanější typy detektorů v infrakamerách. Detekují změnu elektrických vlastností v závislosti na intenzitě dopadajícího záření. Hlavním zástupcem těchto detektorů je bolometr. Ten se vlivem dopadajícího záření ohřívá, a tím dochází ke změně jeho elektrického odporu.

Detektorem infračervené kamery je pak tzv. bolometrické pole. Jedná se o daný počet bolometrů (závisí na rozlišení kamery) uspořádaných vedle sebe, nejčastěji do tvaru čtverce nebo kruhu, viz. Obr. 4. Toto bolometrické pole je obecně označováno jako mikrobolometr.

Jednotlivé bolometry mají můstkovou strukturu. Ta zajišťuje dobrou tepelnou izolaci mezi vlastním mikrobolometrem a křemíkovým substrátem, který tvoří podklad mikrobolometru. Pro zvýšení účinnosti mikrobolometru je pod jednotlivé bolometry nanесena reflexní vrstva, viz. Obr. 3. Ta slouží k odrazu záření, které nebylo absorbováno. Dalším výhodou reflexní vrstvy je potlačení vlivu teploty substrátu. Záření emitované substrátem je reflexní vrstvou odraženo zpět. Mezi hlavní výhody mikrobolometrických detektorů patří velká citlivost, možnost měřit velký rozsah teplot, malé rozměry, krátká časová konstanta.



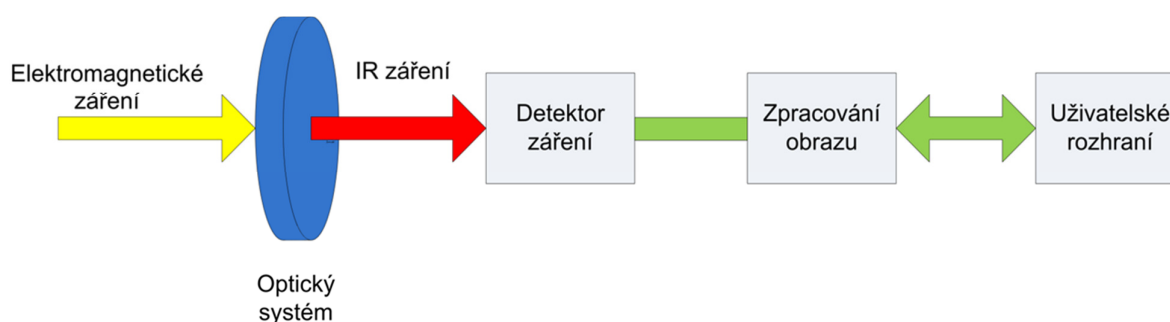
Obrázek 3: Struktura mikrobolometru [24]



Obrázek 4: Kruhový mikrobolometr [23]

Druhým typem detektorů jsou detektory fotonové. Mají vyšší citlivost než detektory tepelné, využívají se tedy především pro vědecké a výzkumné účely. Pracují na principu detekování kvant elektronového záření. Nejčastěji používaným materiálem pro výrobu fotonových detektorů jsou PtSi a InSb. Pro měření kamerou s fotonovým detektorem je potřeba detektor chladit.

Zpracování signálu získaného z detektorů bývá realizováno procesorem umístěným přímo v těle kamery. Ten je schopen například změnu elektrických vlastností detektoru převést na výsledný termogram. Během tohoto převodu však musí být provedena autokalibrace kamery a korelace výsledného obrazu pro získání maximální ostrosti termogramu. [20, 21, 22]



Obrázek 5: Zjednodušené schéma konstrukce termokamery [20]

2.8.3 Základní fyzikální zákony v termografii

Pro pochopení problematiky termografie je potřeba znát základní zákony popisující záření. Mezi ty to zákony patří Planckův vyzařovací zákon, Wienův posouvající zákon, Stefan-Boltzmannův zákon a Kirchhoffův zákon.

2.8.3.1 Planckův vyzařovací zákon

Planckův zákon říká, že záření o frekvenci f může být vyzařováno nebo pohlcováno jen po kvantech energie, jejichž velikost je dána vztahem

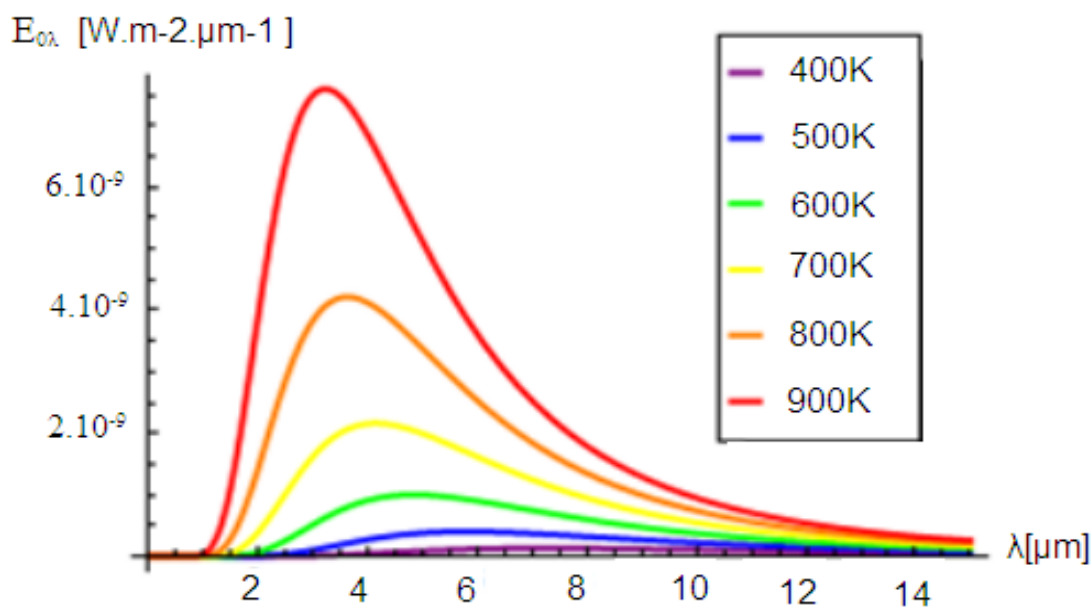
$$e = h \cdot f , \quad (2.8.1)$$

kde h je Planckova konstanta $6,6256 \cdot 10^{-34}$ (J·s).

Pro dokonale černé těleso umístěné ve vakuu, lze z Planckova zákona odvodit matematickou závislost spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa $E_{o\lambda}$ na vlnové délce záření λ a teplotě zářiče T

$$E_{0\lambda} = \frac{dE_0}{d\lambda} = f(\lambda, T) = c^2 \cdot h \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1}, \quad (2.8.2)$$

kde E_0 je hustota zářivého toku dokonale černého tělesa a k je Boltzmannova konstanta, která má hodnotu $k = 1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ [J} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$.



Graf 2: Závislost spektrální hustoty zářivého toku na vlnové délce záření [18]

V grafu 2 jsou vykresleny závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření pro různé teploty zdroje záření. Z grafu je vidět, že se zvětšující se teplotou zdroje, se zvětšuje spektrální hustota zářivého toku dokonale černého tělesa a maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku se posouvá ke kratším vlnovým délkám. Tento jev popisuje Wienův posunovací zákon. [15]

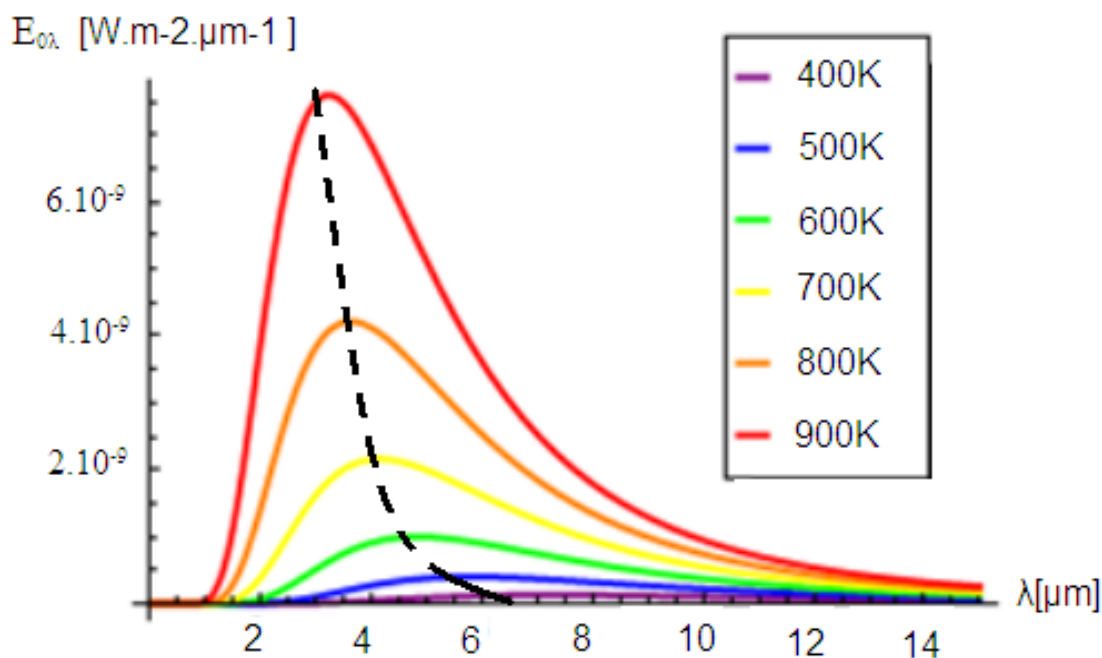
2.8.3.2 Wienův posunovací zákon

Dalším zákonem popisujícím záření je Wienův posunovací zákon. Vychází z Planckova zákona. Pro získání hodnot maxim jednotlivých izoterm je potřeba provést derivaci spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa $E_{0\lambda}$ dle vlnové délky λ a tuto derivaci položit rovno nule.

Jak již bylo uvedeno, maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku se s rostoucí teplotou zářiče posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám. Matematicky lze Wienův zákon vyjádřit vztahem

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,8978 \cdot 10^{-3}, \quad (2.8.3)$$

kde λ_{\max} je vlnová délka, při níž je hodnota spektrální hustoty zářivého toku při dané teplotě zářiče maximální. [16]



Graf 3: Grafické znázornění Wienova posunovacího zákona [18]

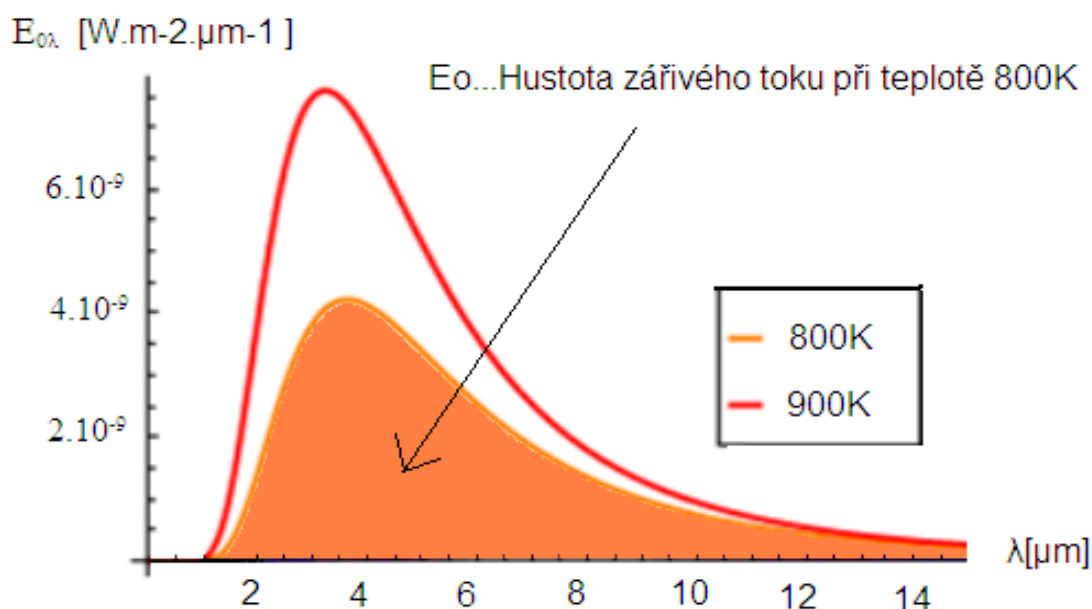
2.8.3.3 Stefan - Boltzmannův zákon

Třetím zákonem popisujícím záření je Stefanův - Boltzmannův zákon. Ten říká, že každé těleso, které má nenulovou absolutní teplotu (tedy všechna tělesa na zemi), září. Přičemž hustota zářivého toku je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty.

Stefan – Boltzmanův zákon také vychází z Planckova zákona. Matematický zápis Stefanova -Boltzmanova zákona získáme integrací spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa $E_{o\lambda}$ při konstantní teplotě. Tuto integraci provedeme přes celý rozsah vlnových délek. Výsledkem je následující vztah

$$E_o = \sigma \cdot T^4, \quad (2.8.4)$$

kde σ je Stefan- Boltzmannova konstanta $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}\text{)}$. E_o je hustota zářivého toku dokonale černého tělesa.



Graf 4: Znáznornění hustoty zářivého toku tělesa při teplotě 800K [18]

Pro nedokonalé zářiče lze pak hustotu zářivého toku vyjádřit vztahem

$$E_o = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (2.8.5)$$

kde ε je emisivita (poměrná zářivost) zářiče.

Emisivita nebo také poměrná zářivost vyjadřuje schopnost zářiče vyzařovat. Dokonalé zářiče (dokonale černá tělesa) mají $\varepsilon = 1$, nedokonalé zářiče (reálná tělesa) mají $\varepsilon \in (0, 1)$. Hodnoty emisivit pro různé povrchy lze nalézt v tabulkách.[17]

2.8.4 Zásady použití termokamery

Při měření termokamerou jsou naměřené výsledky ovlivňovány řadou vnějších vlivů, jako jsou např. záření okolních objektů, odrazivost měřeného objektu popř. záření prostředí (plyn, vzduch). Při měření je potřeba podrobně znát informace o měřeném tělese a o prostředí, ve kterém se těleso nachází.

V zásadě existují tři vlastnosti, jimiž se reálné objekty odlišují od absolutně černého tělesa. Jsou to reflektance r tedy odrazivost tělesa, absorptance a tedy pohltivost tělesa a transmitance t neboli propustnost tělesa.

Dalším velmi důležitým parametrem při měření termokamerou je emisivita ε . Emisivita je definovaná jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Emisivita zde charakterizuje schopnost tělesa vyzařovat teplo. Emisivita je pro různé materiály různá a často je funkcí řady parametrů, např. teploty objektu, vlnové délky, barvy povrchu, struktury povrchu atd. Hodnotu emisivity je potřeba vložit přímo do termokamery jako jeden z parametrů.

Závislost emisivity a absorptance popisuje Kirchhoffův zákon. Ten říká, že každé skutečné těleso záření stejně vyzařuje jako pohlcuje. Tedy platí, že emisivita = absorptanci $\varepsilon = a$.

Při měření termokamerou, stejně jako při jiných technických měřeních, dochází k určité chybě naměřených výsledků. Při měření je nutné správně stanovit a v kameře nastavit základní parametry jako je emisivita, relativní vlhkost, teplota a průteplivost prostředí atd. Je také potřeba zohlednit vlastní chybu termokamery, která je udávána výrobcem. Nezbytné je dodržet správný pracovní postup včetně zjištění informací o měřeném tělese. [18, 20, 21, 22]

3 Experiment

Cílem experimentu bylo měření teploty desky rekuperačního výměníku a následné vyhodnocení rozložení součinitele přestupu tepla mezi deskou a obtékajícím vzduchem. Hlavní částí experimentálního zařízení je "sendvič" čtrnácti hliníkových desek dvoutahového rekuperačního výměníku o tloušťce 0,3 mm. 14 desek tvoří 6 tahů v každém směru. Tyto desky jsou umístěny v rámu, který zajišťuje jejich pevné ustavení. Rám použitý v experimentu je kopií reálného rámu používaného ve vzduchotechnice. Je však speciálně upraven pro potřeby experimentu. Především je rám na povrchu opatřen vrstvou hliníkové fólie, aby nedocházelo k přehřívání materiálu rámu a jeho následným deformacím.

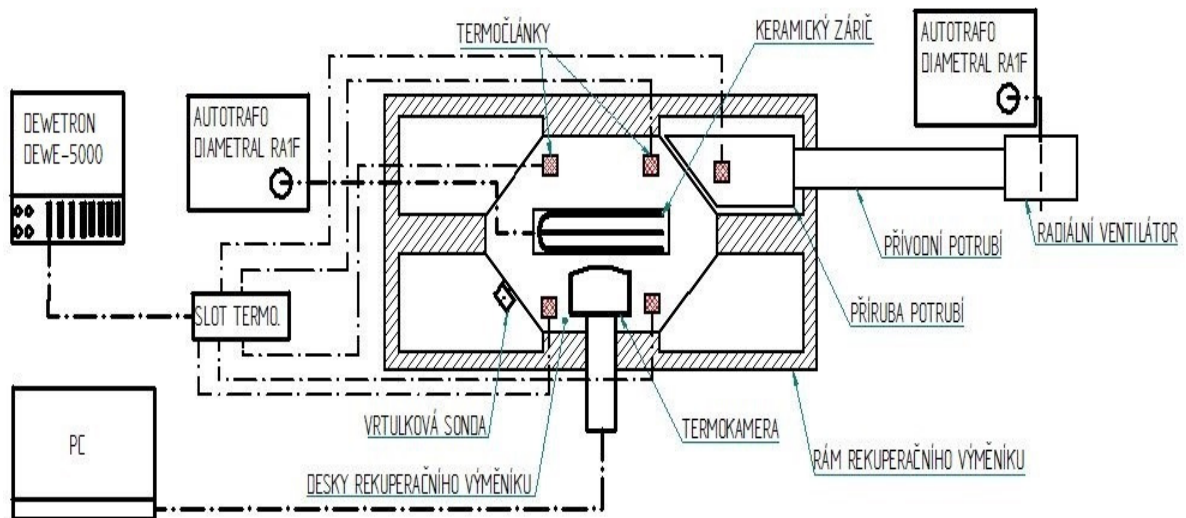
Ohřev desky výměníku byl realizován pomocí radiálního zářiče Elstein FSR 1000. Tento zářič byl umístěn ve vzdálenosti 30 cm nad deskou. Zářič byl spojen s autotrafem značky Diametral, aby bylo možné plynule regulovat příkon zářiče, a tím zajistit jednotlivé režimy ohřevu desky.

Měření teploty bylo prováděno dvěma způsoby. Prvním způsobem bylo měření pomocí sady termočlánků umístěných přímo na povrchu desky výměníku. Tyto termočlánky měří lokální teplotu ve čtyřech bodech desky. Naměřené teploty slouží jako vstupní data pro nastavení experimentu a zároveň pro kalibraci termokamery. Vyhodnocení teplot měřených termočlánky bylo prováděno pomocí multifunkčního analyzátoru Dewetron DEWE-5000. Druhým způsobem měření teploty bylo měření pomocí termokamery. Tou byl snímán povrch desky výměníku při různých režimech. Data naměřená termokamerou byla vyhodnocována pomocí softwaru nainstalovaného v přenosném PC.

Nezbytnou součástí experimentálního zařízení byl přívod obtékajícího vzduchu. Tento vzduch byl přiváděn do "sendviče" desek pomocí příruby. Příruba zajišťuje přivedení vzduchu pouze do prostoru zastavěného výměníkem. Zdrojem přiváděného vzduchu byl radiální ventilátor s maximálním průtokem vzduchu $0,03 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ a maximální rychlostí vzduchu na sání $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tento ventilátor byl podobně jako zářič napojen na regulátor příkonu, aby bylo možné plynule regulovat otáčky ventilátoru, a tím i rychlost vzduchu proudícího výměníkem.

Experimentální zařízení bylo dále vybaveno další podpůrnou a měřicí technikou pro zajištění bezproblémového chodu a zjištění maximálního množství informací o měřených veličinách. Jedním z takových zařízení byla například vrtulková sonda od firmy Testo. Pomocí této sondy byla měřena rychlost vzduchu na výstupu z výměníku. Požadavkem bylo, aby se rychlost proudícího vzduchu během experimentu pohybovala v intervalu $(1-3) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Kompletní schéma experimentálního zařízení je na obrázku 6.



Obrázek 6: Schéma experimentálního zařízení

3.1 Sestavení experimentálního zařízení

Tvorba experimentálního zařízení byla prováděna v průběhu dvou měsíců v laboratořích katedry energetických zařízení. V textu níže jsou stručně popsány základní body tvorby experimentálního zařízení včetně fotografií.

Prvním úkolem byla výroba šesti pater rekuperačního výměníku, tzv. sendvič. Desky výměníku byly přesně poskládány tak, aby byl dodržen směr přívodu a odvodu vzduchu v jednotlivých vrstvách sendviče. Po sestavení byly tekutým silikonem zaizolovány všechny strany výměníku, vyjma přívodu a odvodu vzduchu. Na závěr byla horní deska sendviče natřena matnou černou barvou, která zaručila maximální emisivitu povrchu desky.

Dále byla provedena výroba, resp. úprava rámu rekuperačního výměníku. Ten byl připraven tak, aby bylo možné upevnit desky výměníku a přivádět mezi ně vzduch přívodním potrubím s přírubou. Po upevnění desek byla horní strana rámu zakryta tenkou hliníkovou fólií, aby nedocházelo k nadměrnému ohřevu materiálu rámu.

Pro přímé sledování teploty bylo nainstalováno 6 termočlánků. Čtyři na povrchu černé desky výměníku pro měření lokální povrchové teploty a pro kalibraci termokamery. Jeden uvnitř příruby pro měření teploty vzduchu vstupujícího do výměníku a jeden za výměníkem pro měření teploty na výstupu z výměníku. Umístění termočlánků je patrné na obrázku 7.



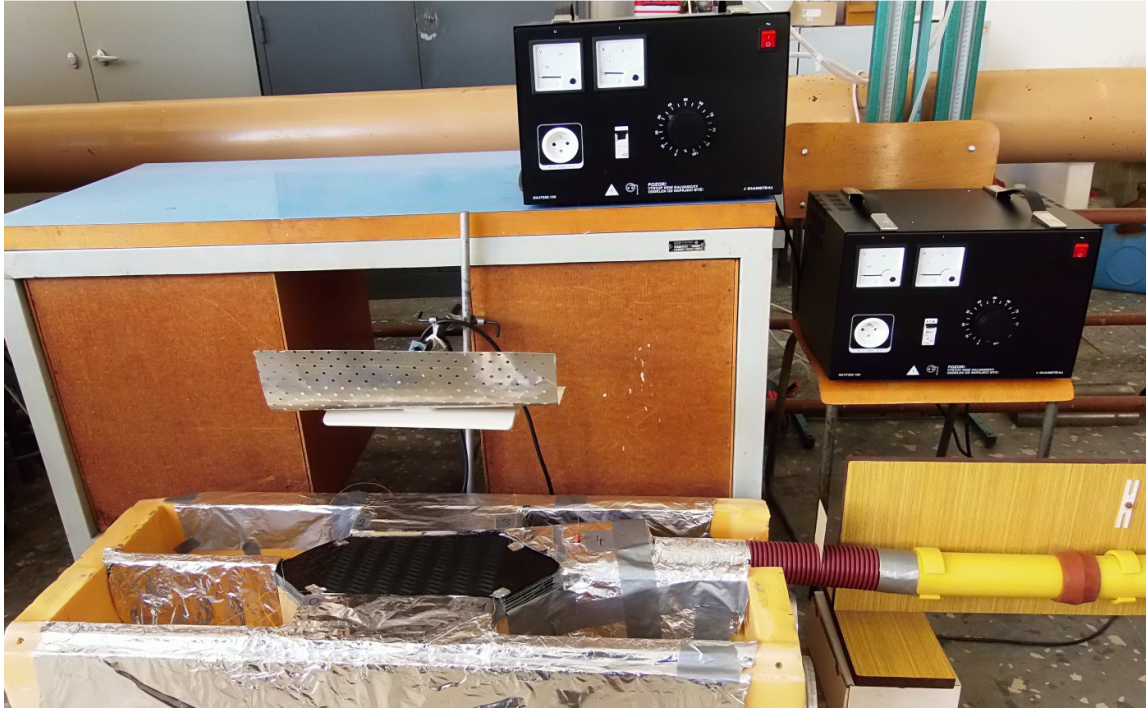
Obrázek 7: Rám rekuperačního výměníku včetně vložených desek a termočlánků

Pro zajištění přívodu vzduchu do výměňkového sendviče, bylo potřeba vyrobit přírubu se specifickým tvarem. Tato příruba přesně lícuje s vstupním průřezem výměníku. Na druhé straně je pevně spojena s přívodním potrubím v podobě plastové trubky o průměru 80 mm. Tato trubka je napojena na radiální ventilátor, čímž je zajištěn požadovaný průtok vzduchu sendvičem.



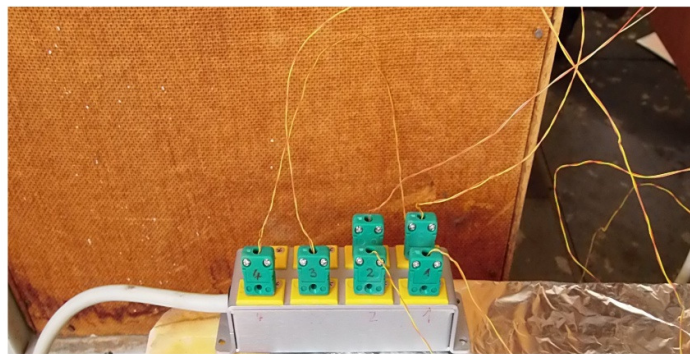
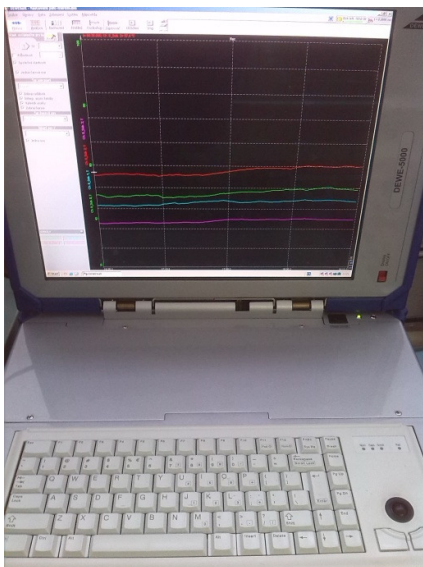
Obrázek 8: Výroba a zabudování příruby pro přívod vzduchu do výměníku

Dalším krokem bylo zapojení regulační techniky. Tedy zapojení autotraf pro keramický zářič a pro ventilátor. Zapojení bylo provedeno napřímou přes zásuvku na 230 (V), kterou je každé z autotraf opatřeno. Obě autotrafa jsou také vybavena voltmetrem a ampérmetrem pro zajištění práce v bezpečném rozsahu zářiče a ventilátoru.



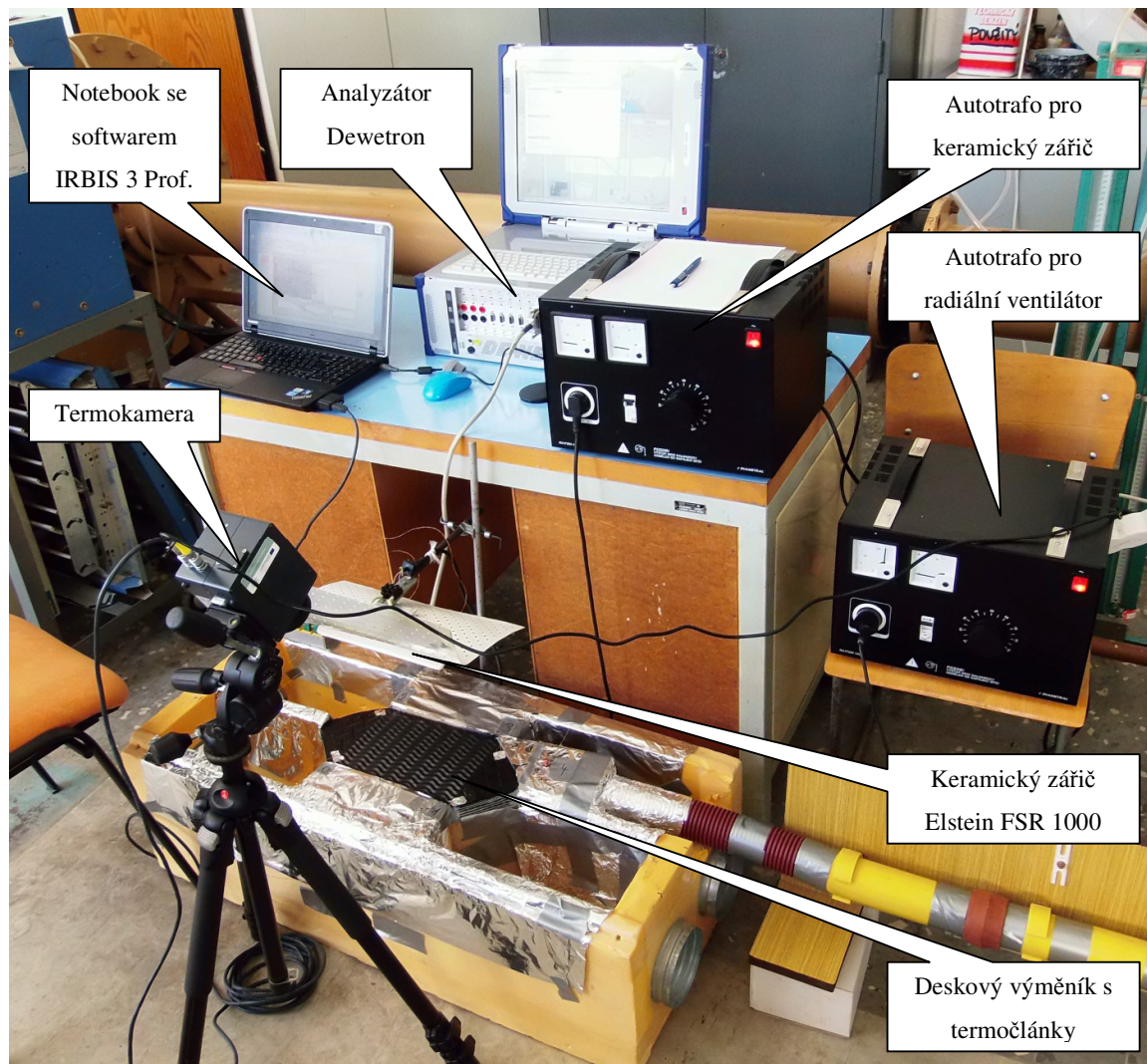
Obrázek 9: Zapojení autotraf pro regulaci zářiče a ventilátoru

Následně bylo experimentální zařízení vybaveno analyzátozem Dewetron- DEWE 5000. Vstupem do analyzátoru je signál snímaný termočláanky. Tento signál je nejprve přiveden do slotu, který je následně zapojen přímo do Dewetronu. Pomocí softwaru je pak měřený signál zpracován na informaci o teplotě kterou termočlánek měří.



Obrázek 10: Analyzátor Dewetron a zapojení termočláneků do sběrného slotu

Nakonec byla zapojena nejdůležitější část experimentálního zařízení termokamera. Pro přenos a vyhodnocování dat měřených, je potřeba propojit termokameru a PC pomocí fireware rozhraní. Pro práci s měřenými daty a jejich analýzu je potřeba nainstalovat software IRBIS 3 Professional.



Obrázek 11: Finální podoba experimentálního zařízení

V experimentu bylo použito několik měřících technik. Od měření teploty, přes měření rychlosti, až po měření příkonu. V následujícím textu je popis nejdůležitějších částí experimentálního zařízení. Jsou zde popsány základní informace a technické parametry včetně informací o chybách jednotlivých měřidel.

3.1.1 Termokamera

V experimentu byla použita laboratorní termokamera VarioCam od firmy Infratec. Tato kamera pracuje na principu mikrobolometrů. Tedy tepelných detektorů převádějících změnu teploty na elektrický signál. Součástí kamery je také software IRBIS 3 Professional, sloužící pro sběr a vyhodnocování měřených dat. Data jsou z kamery přenášena do PC přes FireWire IEEE1394 PCI expres sběrnici.

Spektrální citlivost kamery je (7,5 - 14) μm . Spolehlivě dokáže měřit rozsah teplot (- 40 - 1200) $^{\circ}\text{C}$. Rozlišení termokamery je 0,05 $^{\circ}\text{C}$ při 30 $^{\circ}\text{C}$. Měřicí přesnost závisí na teplotě. Pro interval (0 - 100) $^{\circ}\text{C}$ je přesnost $\pm 1,5$ K, pro interval (< 0 a > 100) $^{\circ}\text{C}$ je přesnost $\pm 2\%$. Emisivitu měřícího objektu lze nastavit v intervalu (0,1 - 1) s přesností 0,01. Nejnižší rozlišení termokamery je 320 x 240 pixel, nejvyšší rozlišení je 640 x 480 pixel. Termokamera obsahuje funkci automatického zaostření a disponuje osminásobným zoomem. [32]

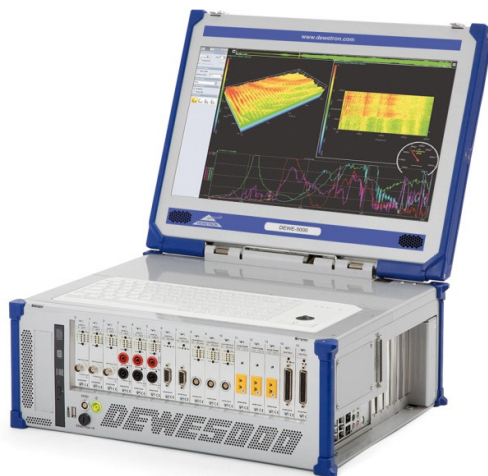


Obrázek 12: Laboratorní termokamera VarioCam [31]

3.1.2 Měřicí stanice Dewetron

Pro analýzu signálů z termočlánků byl použit multifunkční analyzátor Dewetron DEWE-5000. Jedná se o plně automatický analyzátor s velmi širokým použitím. Zařízení obsahuje integrované vstupy většiny rozhraní používaných v měřicí a počítačové technice. Pro měření teploty pomocí termočlánků byl použit osmikanálový LPT konektor. Zařízení umožňuje maximální rychlost vzorkování 100 vzorků/s. Pro experiment byla však dostačující vzorkovací rychlost 1 vzorek/s. Maximální rozlišení analyzátoru je 24 bit.

Dewetron umožňuje měřit a zaznamenávat průběhy teplot jednotlivých termočlánků. Přímou v analyzátoru je integrován software pro tvorbu analýz a vyhodnocování naměřených signálů. Celý systém pracuje na běžném operačním systému Windows 7 [25]



Obrázek 13: Analyzátor DEWE-5000 použitý v experimentu [25]

3.1.3 Sondy pro měření rychlosti vzduchu

Pro měření rychlosti vzduchu obtékajícího desku výměníku byly použity dva typy měřicích sond. Prvním typem byla drátková sonda od firmy Testo, typ 425. Jedná se o sondu pro měření rychlosti a teploty proudu vzduchu. Použití sondy je v intervalu $(0-20) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, rozlišení sondy je $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a deklarovaná maximální chyba měření je $0,03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, popř. $0,5\%/mV$. Při měření dochází ke značnému ohřevu proudícího vzduchu, ale také jeho okolí. Tím dochází ke zvýšenému ohřevu měřícího drátku a ke značným nepřesnostem měření. Při postupném zvyšování teploty proudícího vzduchu z 25°C na 50°C byla naměřena poměrně silná závislost rychlosti na teplotě. Z tohoto důvodu byla drátkovou sondou nakonec naměřena pouze rychlost při počáteční teplotě 25°C .

Tato rychlost byla následně ověřena vrtulkovou sondou. Vrtulková sonda byla taktéž od firmy Testo, typ 416. Použití sondy je v intervalu $(0,6-40) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, rozlišení sondy je $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a deklarovaná maximální chyba měření je $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, popř. $1,5\%/mV$. Z uvedených hodnot je zřejmé, že vrtulková sonda je přibližně o řád méně přesná než sonda drátková. Pro experiment je však přesnost stále dostačující. Při měření rychlosti vzduchu vrtulkovou sondou již nebyla zaznamenána žádná závislost rychlosti na teplotě. Při měření v intervalu teplot $(25 - 50)^\circ\text{C}$ byla naměřená rychlost téměř konstantní s přesností $\pm 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato rychlost byla zároveň ve velmi dobré shodě s rychlostí naměřenou drátkovou sondou při teplotě 25°C . [25, 26]



Obrázek 15: Drátková sonda Testo 425 [26]



Obrázek 14. Vrtulková sonda Testo 416 [27]

V průběhu experimentu byl použit ještě jeden typ vrtulkové sondy a to sonda Testo 452, viz obrázek 16. Použití sondy je v intervalu $(0,2-60) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, rozlišení sondy je $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a deklarovaná maximální chyba měření je $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, popř. $2,5\%/mV$. Tato sonda má oproti vrtulkové sondě Testo 416 mnohem větší průměr vrtulky, konkrétně 100 mm. Proto byla sonda Testo 452 využita pro měření rychlosti vzduchu na sání radiálního ventilátoru. Toto měření bude popsáno později.

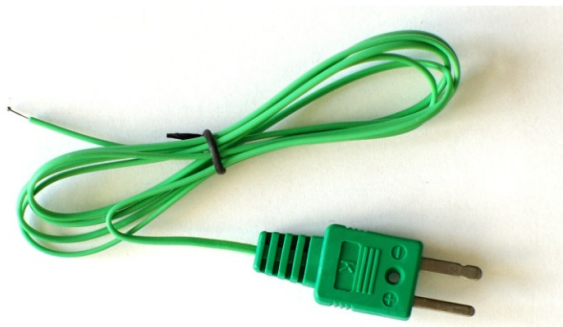


Obrázek 16: Vrtulková sonda Testo 452

3.1.4 Termočlánky

Termočlánek je v podstatě měřicí sonda využívající termoelektrického jevu. Konstrukce termočlánu je tvořena dvěma kovovými drátky a jejich spojením. Nejčastěji se termočlánky využívají pro přesné měření teploty. V závislosti na typu termočlánu lze dosáhnout přesnosti až 0,4%. Pro experiment bylo použito 6 termočlánu typu K. Termočlánky typu K jsou takzvané Chromel-alumelové termočlánky. Pracovní rozsah termočlánu typu K je (-200 až 1250) °C. Maximální chyba měření je 0,75 %. [28]

Termočlánky použité v experimentu byly opatřeny standardizovanou koncovkou pro připojení termočlánu do sběrného slotu. Ten byl v našem případě vyveden do analyzátoru Dewetron.



Obrázek 17: Příklad termočlánu včetně standardizované koncovky [28]

3.1.5 Keramický zářič a autotrafo

Pro externí ohřev desky výměníku, na níž je pomocí termokamery a termočlánu měřena teplota, byl použit keramický ohříváč od firmy Elstein typu FSR 100. Jedná se o radiální zářič velikosti 240 x 60 mm s elektrickým výkonem 1000 W. Tento typ zářiče má maximální povrchovou teplotu 750°C s tím, že při maximálním příkonu lze této teploty dosáhnout během dvou minut. Pro experiment však byla potřeba maximální teplota zářiče přibližně 250°C. Pro možnost plynulé regulace příkonu byl zářič zapojen ke zdroji napětí přes autotrafo značky Diametral, typ RA1F250.100. Autotrafo je opatřeno potenciometrem, který je ocejchován od 0% do 100% příkonu. Tímto potenciometrem bylo umožněno plynule regulovat příkon ohříváče, a tím i povrchovou teplotu desky výměníku. Stejným autotrafem byl také regulován příkon radiálního ventilátoru. [29]



Obrázek 18: Keramický zářič Elstein FSR 1000 [29]



Obrázek 19: Autotrafo Diametral RA1F250.100 [30]

3.1.6 Wattmetr

Pro měření příkonu a vyhodnocení volt-ampérové charakteristiky radiálního ventilátoru a keramického zářiče byl použit wattmetr HM8115-2 od firmy Hameg. Tento wattmetr má měřicí rozsah pro napětí 0-500 (V) a pro proud 0-16 (A). Dokáže měřit výkon až do 8000 (W). Měření je provedeno s přesností $\pm 0,4$ %.



Obrázek 20: Wattmetr HM 8115-2, Hameg [34]

3.1.7 Kalibrační pec

Kalibrační pec Ametek ATC-650B byla použita pro kalibraci termočlánků. Tato pec umožňuje teplotní kalibraci v rozsahu 30°C - 700°C. Rozlišení kalibrační pece je 0,01°C a přesnost 0,02°C. Hloubka kalibrační pece je 160 mm. Kalibrace termočlánků je popsána v textu níže.

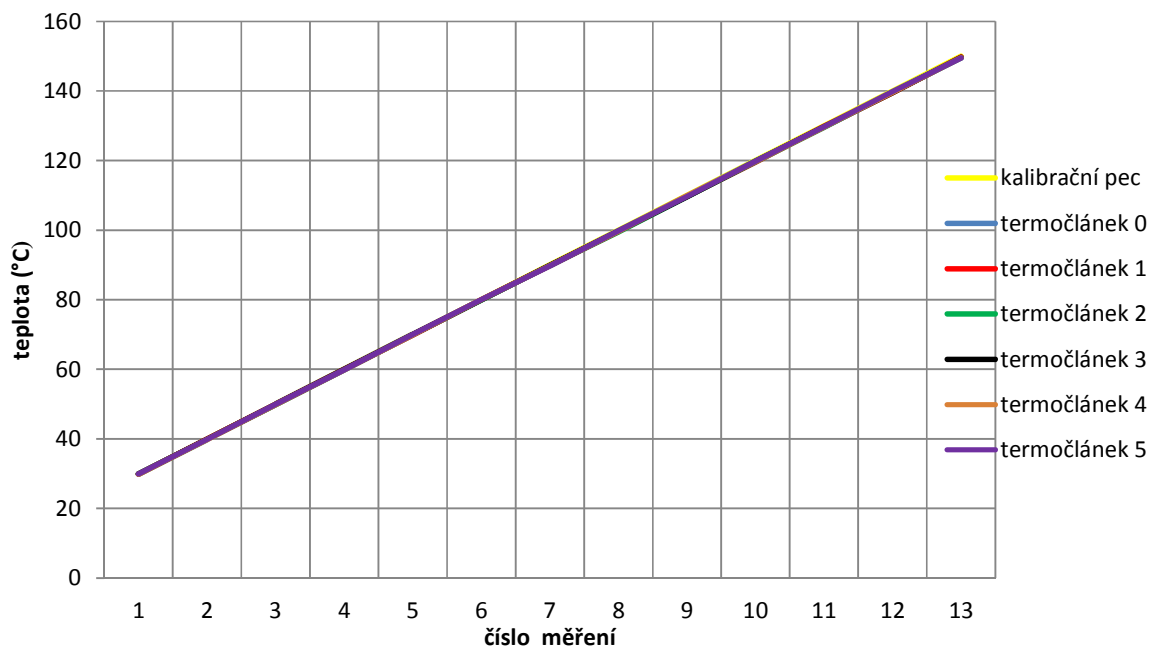


Obrázek 21: Kalibrační pec s vloženými termočlánky

Během experimentu byla prováděna kalibrace termokamery na základě teplot měřených termočlánky. Bylo tedy nezbytné i tyto termočlánky před použitím zkalibrovat. Teplotní rozsah experimentu byl 20°C-150°C. Jak již bylo zmíněno výše, kalibrační pec umí kalibrovat od 30°C. Kalibrace termočlánků byla tudíž provedena v teplotním rozsahu 30°C-150°C. Kalibrační krok byl zvolen na 10°C. Z grafu níže je patrné, že termočlánky použité v experimentu měří teplotu velmi přesně. Téměř v celém rozsahu jsou odchylky měřených hodnot od hodnoty zvolené na kalibru v rozmezí $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Vzhledem k tomu, že termokamerou měříme teplotu $\pm 5^\circ\text{C}$, jedná se o dostatečnou přesnost měření.

Tabulka 1: Teploty naměřené při kalibraci termočlánků

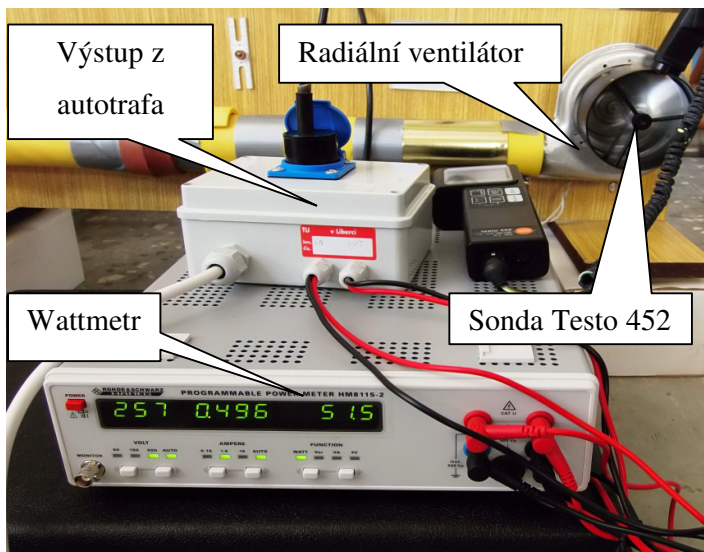
Pec (°C)	Termočl. 0 (°C)	Termočl. 1 (°C)	Termočl. 2 (°C)	Termočl. 3 (°C)	Termočl. 4 (°C)	Termočl. 5 (°C)
30	30,0	29,9	30,0	30,0	29,9	30,0
40	39,9	40,0	39,9	40,0	39,8	39,9
50	49,8	50,0	49,8	49,9	49,8	50,0
60	59,9	60,0	59,8	60,0	59,8	59,9
70	69,8	69,8	69,9	70,0	69,8	70,0
80	79,9	79,9	79,8	79,9	80,0	80,0
90	89,8	89,9	89,9	89,9	89,8	89,7
100	99,8	99,6	99,5	99,7	99,6	99,8
110	109,8	109,7	109,6	109,6	109,9	109,7
120	119,9	119,5	119,6	119,8	119,7	119,8
130	129,5	129,8	129,5	129,7	129,6	129,7
140	139,6	139,5	139,7	139,5	139,6	139,8
150	149,5	149,8	149,6	149,7	149,6	149,5



Graf 5: Porovnání teplot termočlánků a teploty kalibrační pece

3.2 Měření hmotnostního toku obtékajícího vzduchu

Jak již bylo zmíněno, pro chlazení ohříváných desek byl do výměníku přiváděn vzduch pomocí radiálního ventilátoru. Jedná se o malý radiální ventilátor s dozadu zahnutými lopatkami a průměrem oběžného kola 100 mm. Pro určení množství vzduchu při jednotlivých režimech experimentu bylo zapotřebí provést měření přímo na ventilátoru. Na obrázku 22 lze vidět uspořádání měřicí techniky pro určení parametru ventilátoru a hmotnostního toku. [35]



Obrázek 22: Zařízení pro měření na ventilátoru

Základním úkolem tohoto měření bylo určit hmotnostní tok protékající přívodním potrubím do výměníku při jednotlivých režimech ventilátoru, resp. při jednotlivých polohách potenciometru na autotrafu. Pomocí Wattmetru bylo měřeno napětí, proud a příkon přitékající do ventilátoru. Vrtulkovou sondou byla měřena rychlost vzduchu na sání ventilátoru. Z této rychlosti byl následně užitím rovnice kontinuity vypočten hmotnostní tok přiváděného vzduchu.

$$\dot{m} = \rho \cdot c \cdot A \quad (3.1)$$

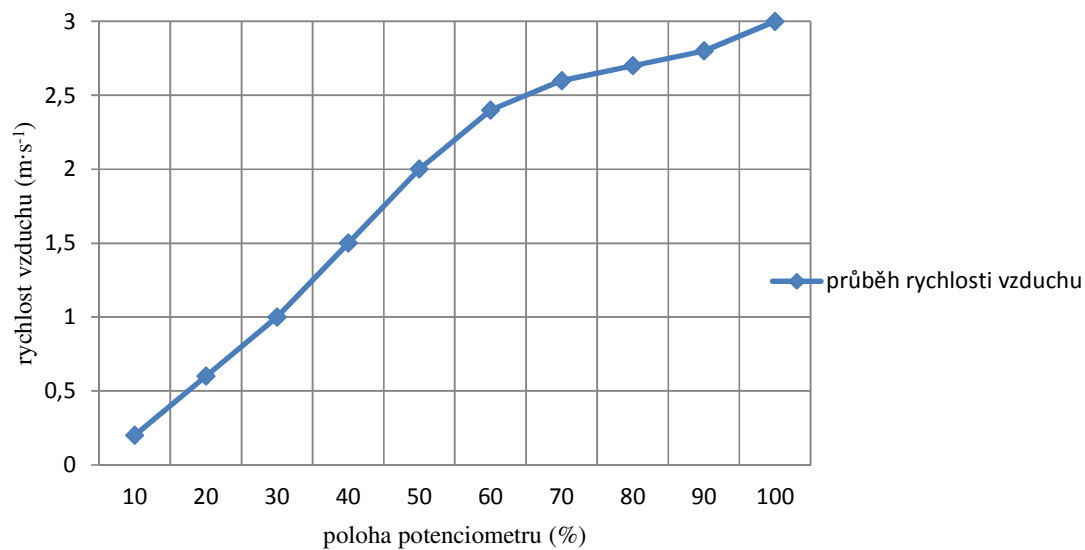
Kde ρ je hustota vzduchu při 25°C ($\rho = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), c je rychlost proudícího vzduchu a A je plocha vstupního průřezu ventilátoru.

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3.2)$$

Kde d je průměr vstupního hrdla radiálního ventilátoru ($d=100 \text{ mm}$). Všechny změřené i vypočtené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 2: Změřené a vypočtené parametry pro ventilátor

Hodnota na potenciometru (%)	Rychlost vzduchu ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Průtok vzduchu ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	Napětí na ventilátoru (V)	Proud tekoucí do ventilátoru (A)	Příkon ventilátoru (W)
10	0,2	0,002	25,4	0,03	0,5
20	0,6	0,006	53,2	0,06	2,4
30	1,0	0,009	79,0	0,11	5,4
40	1,5	0,014	103	0,1	9,7
50	2,0	0,019	129	0,19	14,8
60	2,4	0,023	154	0,22	18,8
70	2,6	0,024	180	0,26	24,6
80	2,7	0,025	205	0,31	31,6
90	2,8	0,026	230	0,39	39,7
100	3,0	0,028	257	0,40	51,6



Graf 6: Závislost rychlosti vzduchu na poloze potenciometru autotrafa

3.3 Určení tepelného výkonu zářiče

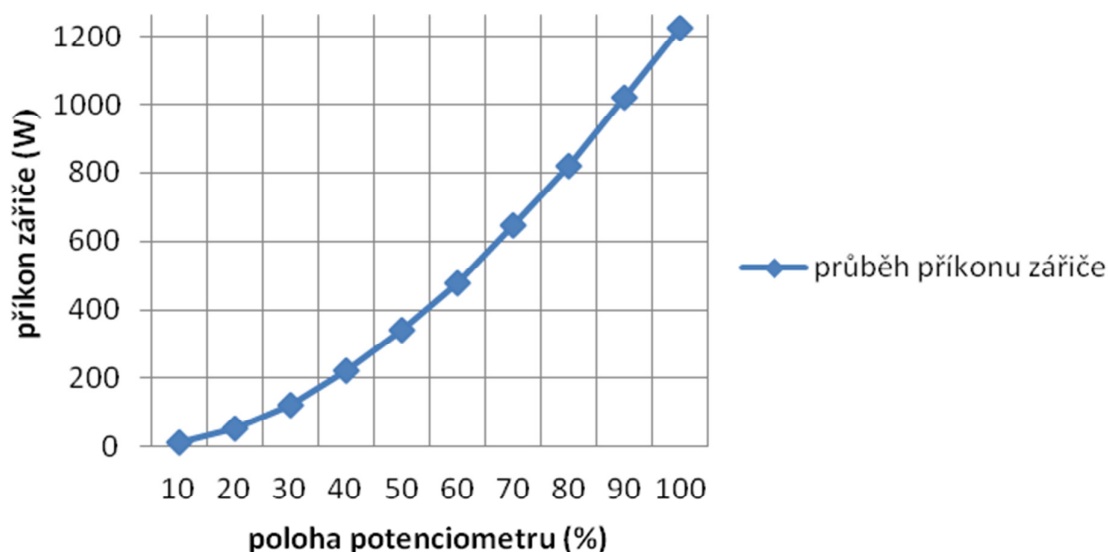
Další důležitou veličinou pro experiment je tepelný výkon zářiče. Cílem tohoto měření bylo zjistit, jaký tepelný výkon produkuje keramický zářič při odpovídajících polohách potenciometru na autotrafu. Pomocí Wattmetru bylo měřeno napětí, proud a příkon přitékající do zářiče. Výrobce keramického zářiče Elstein je pro model FSR 1000 deklaruje účinnost vyšší než 80%. Tuto účinnost lze také ověřit na základě naměřených hodnot příkonu. Jak již bylo zmíněno, zářič FSR 1000 má jmenovitý výkon 1000 (W). Pro teoretickou účinnost pak platí následující vztah

$$\eta = \frac{P}{P_r} = \frac{1000}{1224} = 0,82, \quad (3.3)$$

kde P je jmenovitý výkon zářiče a P_r naměřený příkon zářiče. Výpočet potvrzuje, že deklarovaná účinnost je pravdivá. Všechny změřené i vypočtené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce. [29]

Tabulka 3: Změřené a vypočtené parametry pro keramický zářič

Hodnota na potenciometru (%)	Napětí na zářiči (V)	Proud tekoucí do zářiče (A)	Příkon zářiče (W)	Výkon zářiče dle vztahu (3.3) (W)
10	26,9	0,53	14	12
20	52,9	1,04	55	45
30	79,0	1,55	122	100
40	107	2,09	223	182
50	132	2,58	339	277
60	157	3,05	479	391
70	183	3,53	646	528
80	207	3,97	820	670
90	231	4,41	1021	834
100	254	4,81	1224	1000



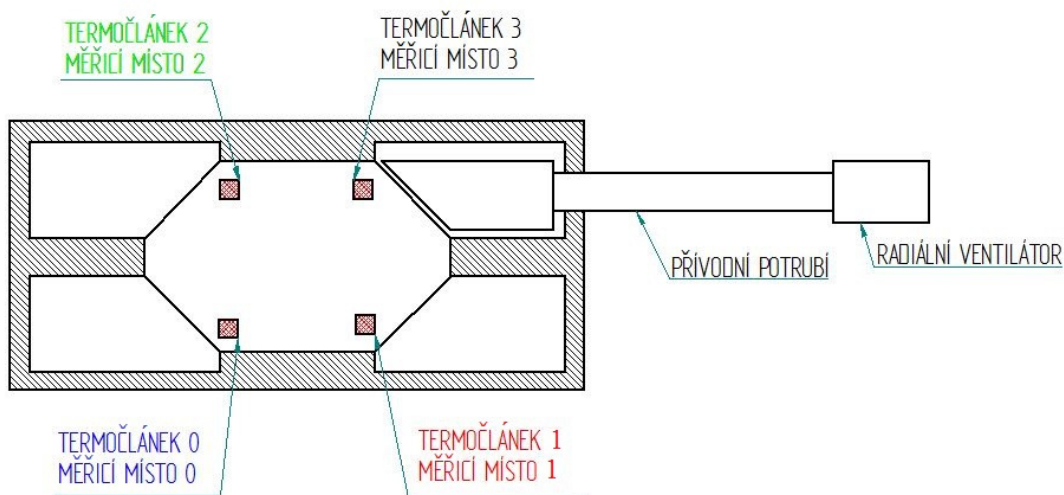
Graf 7: Závislost příkonu zářiče na poloze potenciometru autotrafa

3.4 Kalibrace termokamery

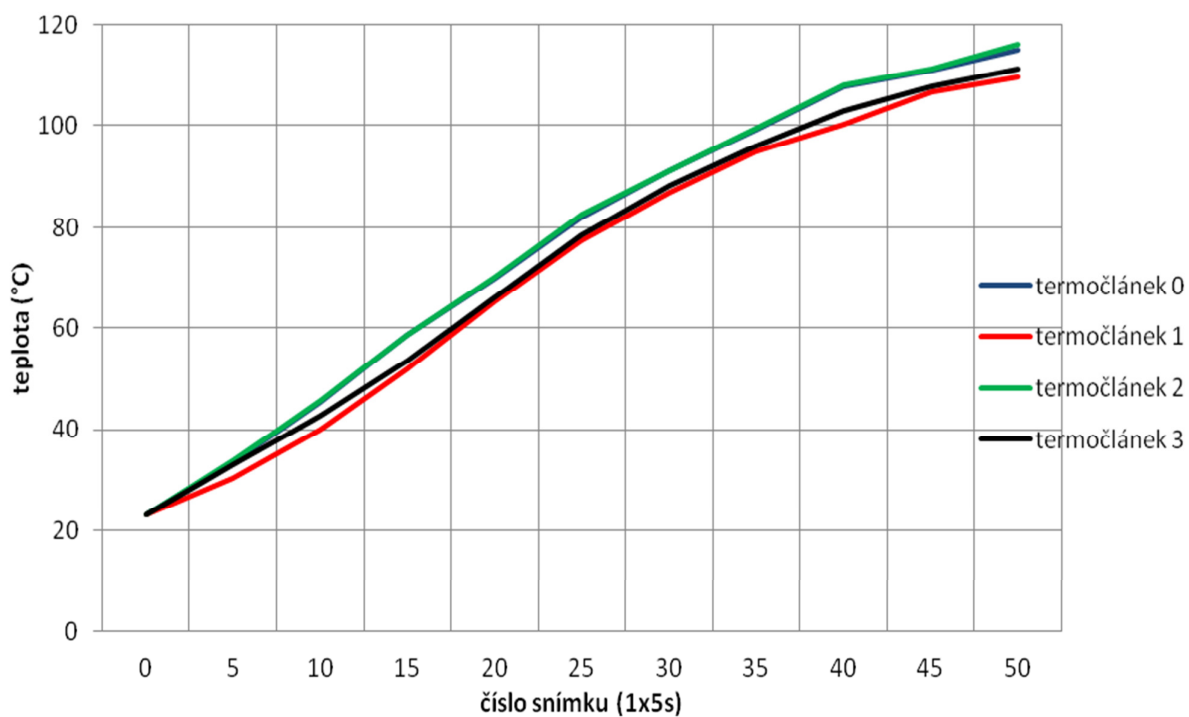
Kalibrace termokamery byla prováděna pomocí sady termočlánků umístěných na desce výměníku. Tato deska byla postupně zahřívána z teploty okolí cca 20°C na teplotu vyšší než 110°C. Následně byla teplota desky snižována ochlazováním z dosažené teploty zpět na teplotu okolí. Teplota měřená termočlánky byla porovnávána s teplotou naměřenou termokamerou. Na termokameře byly postupně upravovány parametry měření tak, aby teploty byly v maximální shodě. Nejdůležitějším parametrem je nastavení emisivity ε . Ta je na počátku měření nastavena $\varepsilon=1$. V průběhu měření byla emisivita snižována až na výslednou hodnotu $\varepsilon=0,9$. Při této hodnotě emisivity povrchu desky a po nastavení dalších potřebných parametrů měření, byla dosažena shoda výsledků měřených termočlánky a termokamerou v rozsahu $\pm 5^\circ\text{C}$.

3.4.1 Kalibrace při ohřevu

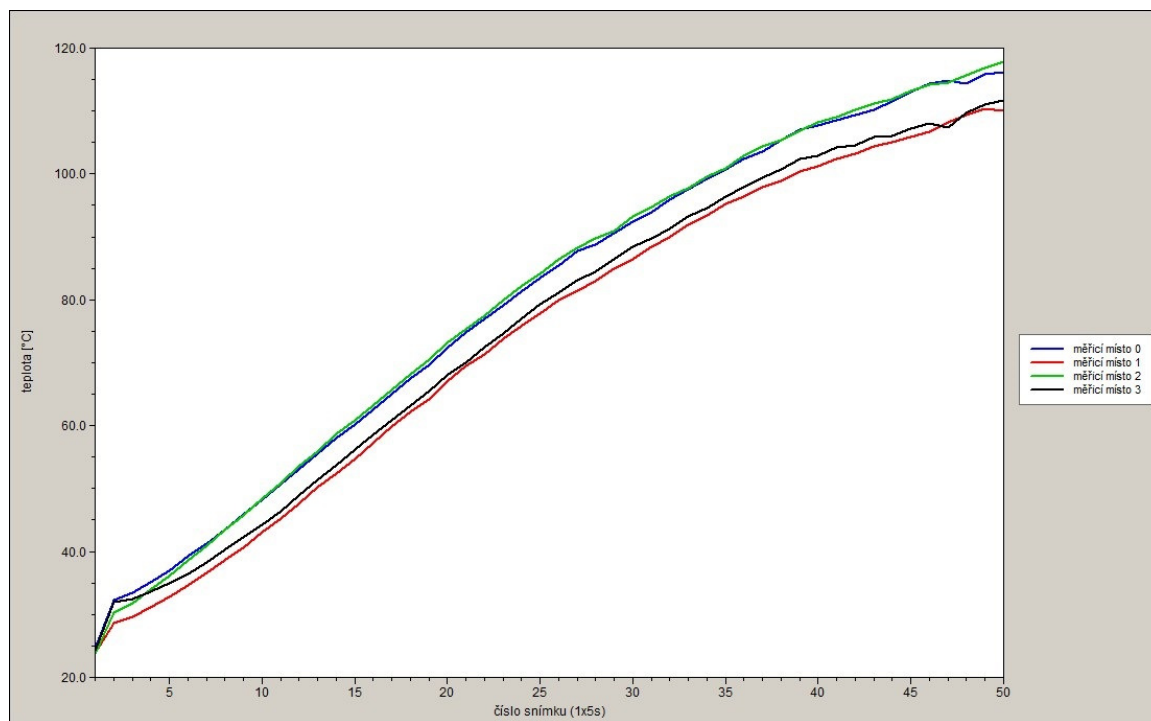
Kalibrace při ohřevu byla prováděna rovnoměrným zahříváním desky. V průběhu tohoto zahřívání byla každých 5s zaznamenána teplota termokamerou a každou 1s zaznamenána teplota měřená termočláanky. Výsledné porovnání obou měření je v grafech níže. Pro vytvoření grafu průběhu teplot měřených termočláanky byla z celkového souboru naměřených dat vybrána každá pátá hodnota. Tedy danému snímku termokamery pořízenému jednou za 5 sekund odpovídá aktuální hodnota naměřená termočláanky. Na následujícím obrázku je zobrazeno rozmístění termočláanek a měřicích míst. Měřicím místem jsou body, které byly zvoleny pro vyhodnocování při měření termokamerou. Tyto body jsou umístěny v bezprostřední blízkosti termočláanek, aby byla zajištěna minimální odchylka měřených dat.



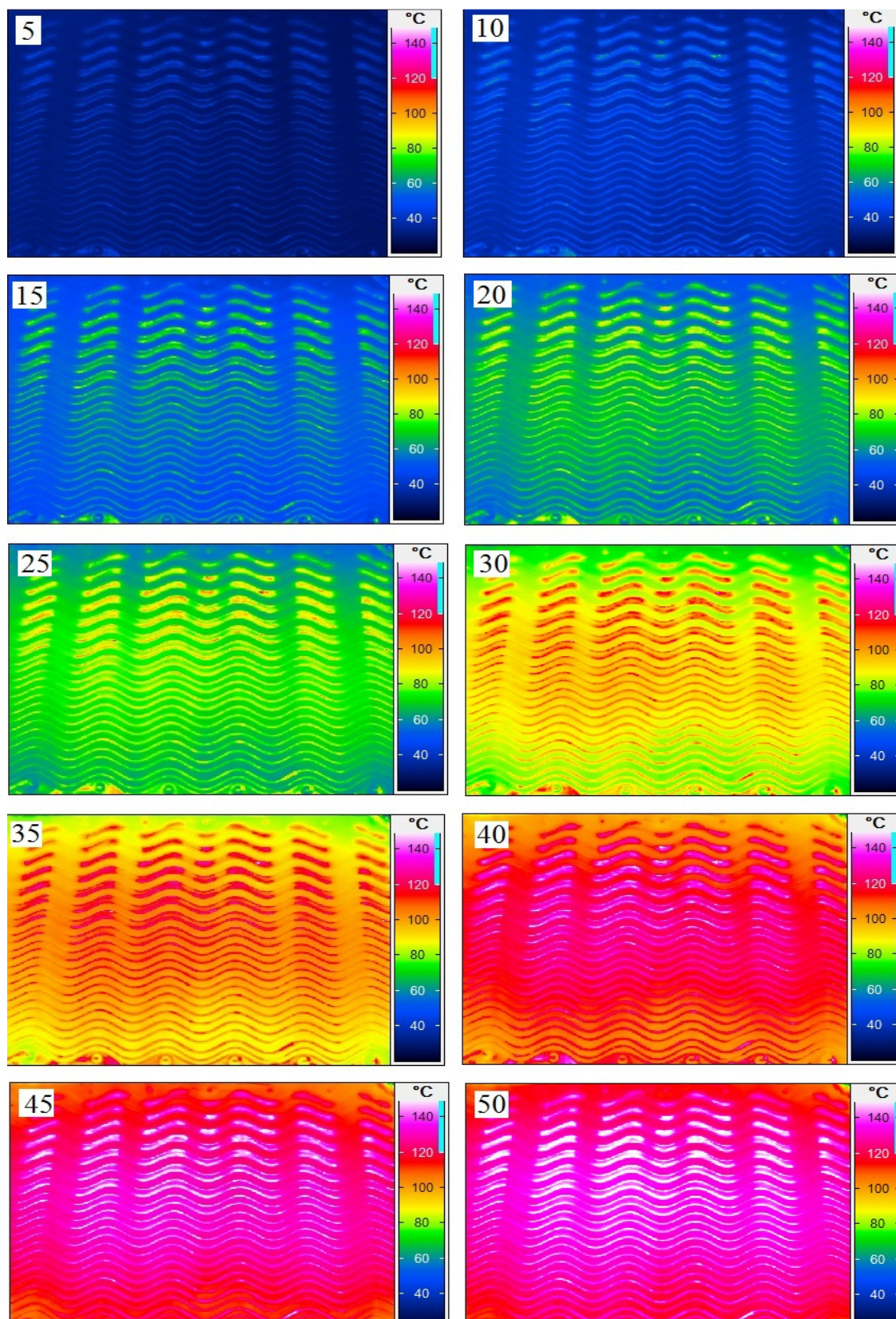
Obrázek 23: Rozložení termočláanek a měřicích míst na desce výměníku



Graf 8: Průběh teplot měřených termočláanky (ohřev)



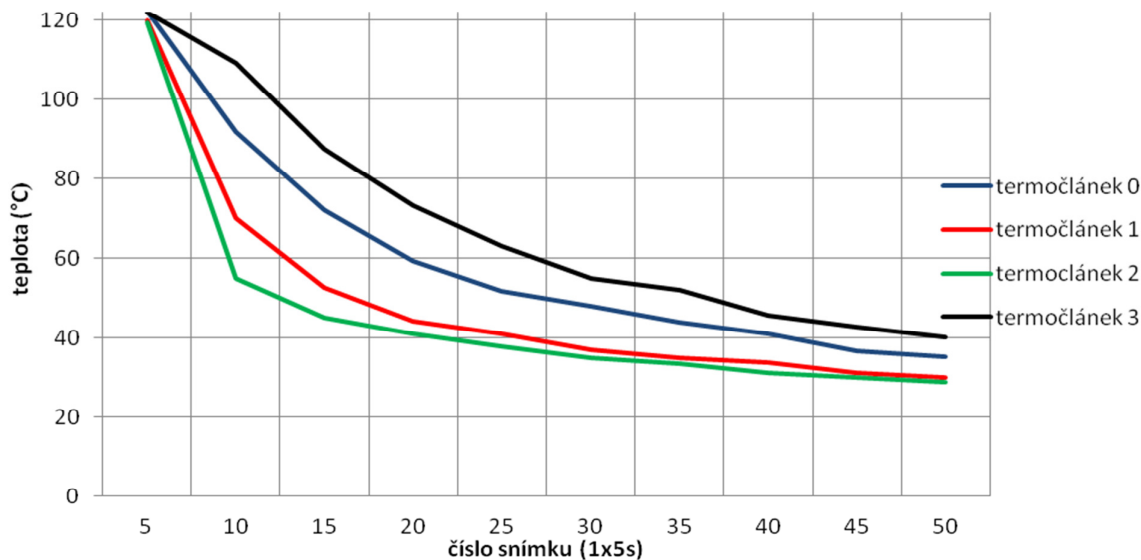
Graf 9: Průběh teplot měřených termokamerou (ohřev)



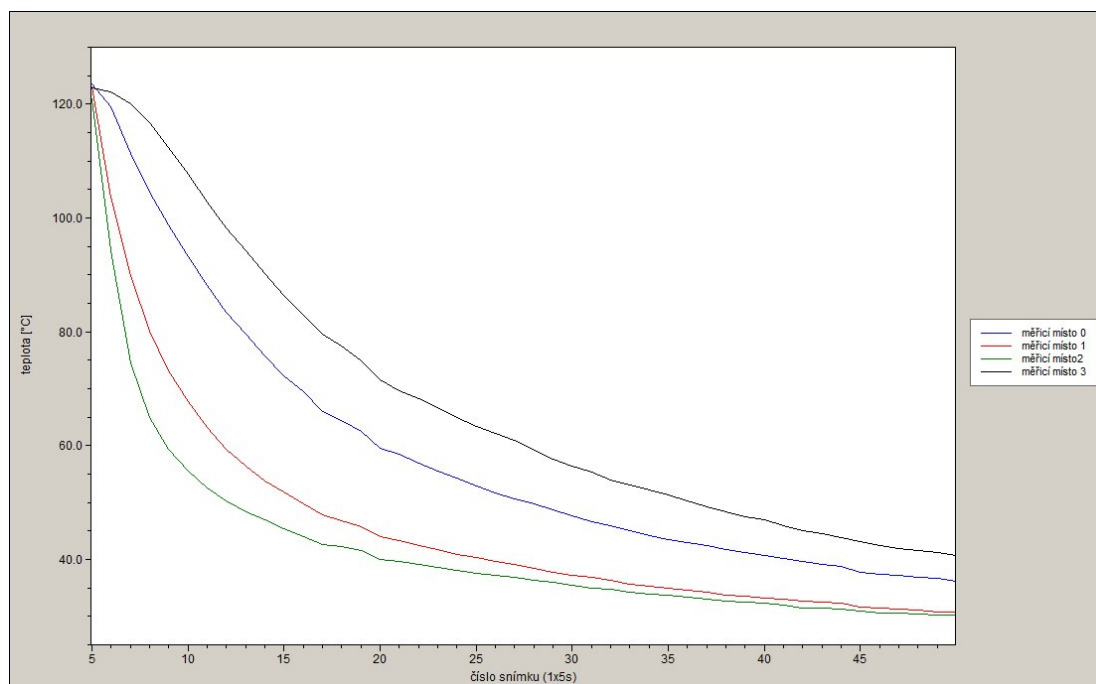
Obrázek 24: Rozložení teplotního pole při kalibračním ohřevu

3.4.2 Kalibrace při chlazení

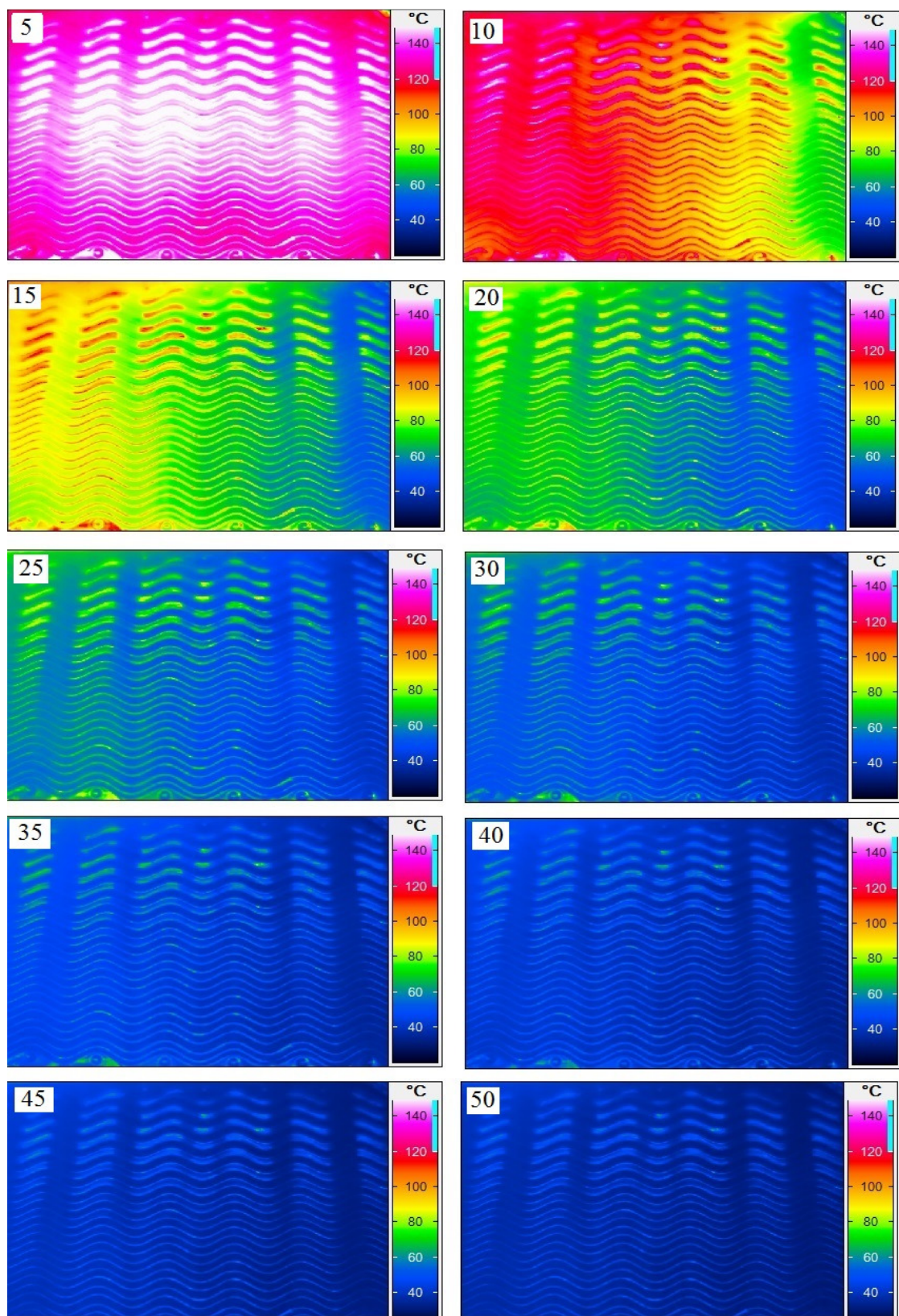
Kalibrace při chlazení byla prováděna na totožném principu jako kalibrace při ohřevu. Po dosažení konečné teploty vyšší než 100°C byla deska následně ochlazována proudícím vzduchem. Pro kalibrační chlazení byla zvolena maximální hodnota průtoku vzduchu. Potenciometr na autotrafu ovládající ventilátor byl nastaven na 100%.



Graf 10: Průběh teplot měřených termočláneků (chlazení)



Graf 11: Průběh teplot měřených termokamerou (chlazení)



Obrázek 25: Rozložení teplotního pole při kalibračním chlazení

4 Měření dat

Celé experimentální zařízení bylo postaveno tak, aby bylo možné měnit parametry experimentu. Především se jedná o napojení autotraf pro keramický zářič a ventilátor. Toto uspořádání umožňuje provádět měření v různých režimech provozu experimentálního zařízení. Vstupními parametry pro zvolení měřených režimů byly následující závislosti. Závislost rychlosti vzduchu na poloze potenciometru regulačního autotrafa ventilátoru a závislost výkonu keramického zářiče na poloze potenciometru regulačního autotrafa zářiče. Ze zmíněných závislostí byly zvoleny měřené režimy tak, aby mezi jednotlivými režimy byly co největší rozdíly. Celkem bylo pro experimentální měření zvoleno 24 režimů provozu.

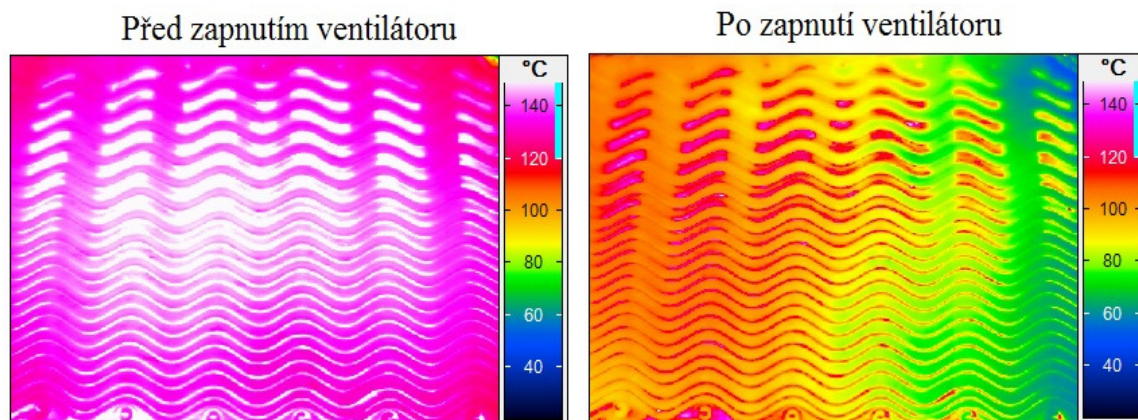
Pro vyhodnocení byly zvoleny následující režimy experimentálního zařízení.

- | | |
|--|---|
| 1) 100% keramický zářič, 100% ventilátor | 2) 100% keramický zářič, 70% ventilátor |
| 3) 100% keramický zářič, 50% ventilátor | 4) 100% keramický zářič, 40% ventilátor |
| 5) 90% keramický zářič, 100% ventilátor | 6) 90% keramický zářič, 70% ventilátor |
| 7) 90% keramický zářič, 50% ventilátor | 8) 90% keramický zářič, 40% ventilátor |
| 9) 80% keramický zářič, 100% ventilátor | 10) 80% keramický zářič, 70% ventilátor |
| 11) 80% keramický zářič, 50% ventilátor | 12) 80% keramický zářič, 40% ventilátor |
| 13) 70% keramický zářič, 100% ventilátor | 14) 70% keramický zářič, 70% ventilátor |
| 15) 70% keramický zářič, 50% ventilátor | 16) 70% keramický zářič, 40% ventilátor |
| 17) 60% keramický zářič, 100% ventilátor | 18) 60% keramický zářič, 70% ventilátor |
| 19) 60% keramický zářič, 50% ventilátor | 20) 60% keramický zářič, 40% ventilátor |
| 21) 50% keramický zářič, 100% ventilátor | 22) 50% keramický zářič, 70% ventilátor |
| 23) 50% keramický zářič, 50% ventilátor | 24) 50% keramický zářič, 40% ventilátor |

pozn. Údaje uvedené v procentech (%) znamenají polohu potenciometru regulačního autotrafa daného zařízení (keramický zářič, ventilátor).

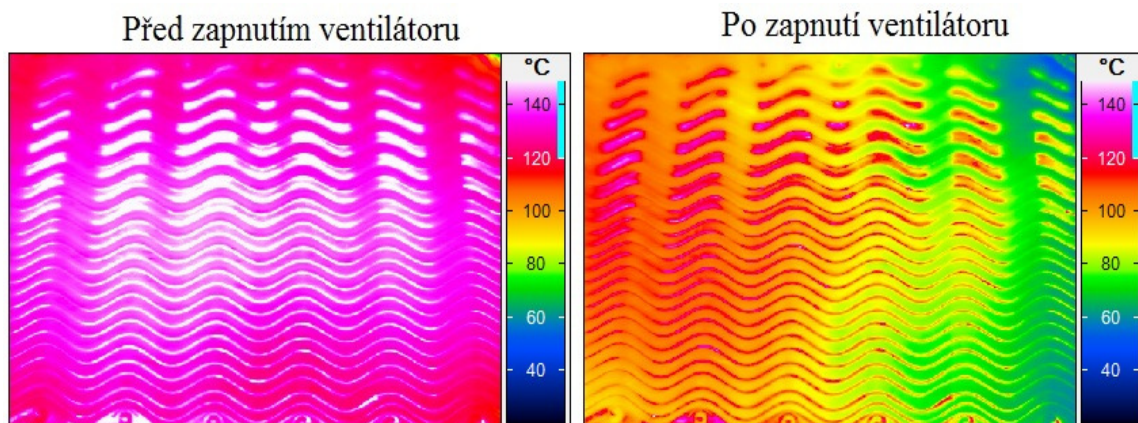
4.1.1 Režimy 100% výkonu keramického zářiče

1) 100% keramický zářič, 100% ventilátor



Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
125	23,0	25,3	2,3

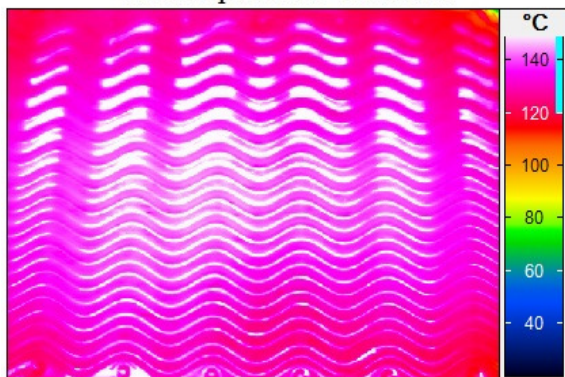
2) 100% keramický zářič, 70% ventilátor



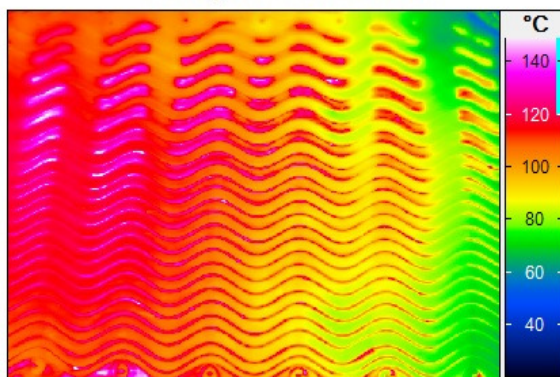
Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
110	23,0	26,2	3,2

3) 100% keramický zářič, 50% ventilátor

Před zapnutím ventilátoru



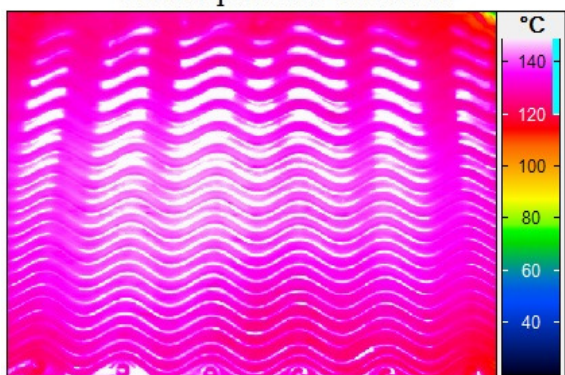
Po zapnutí ventilátoru



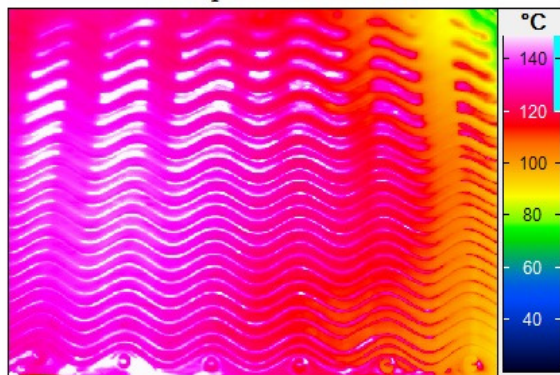
Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
105	23,0	27,3	4,3

4) 100% keramický zářič, 40% ventilátor

Před zapnutím ventilátoru



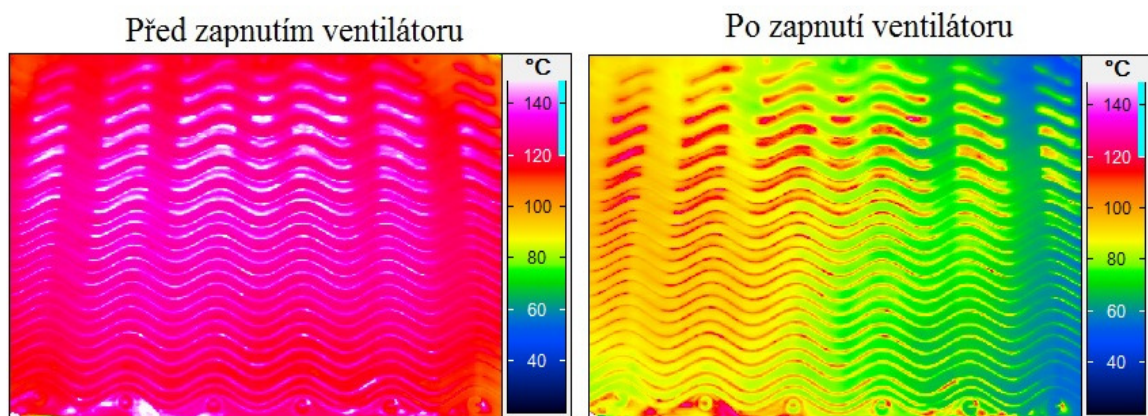
Po zapnutí ventilátoru



Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
105	23,0	40,0	17,0

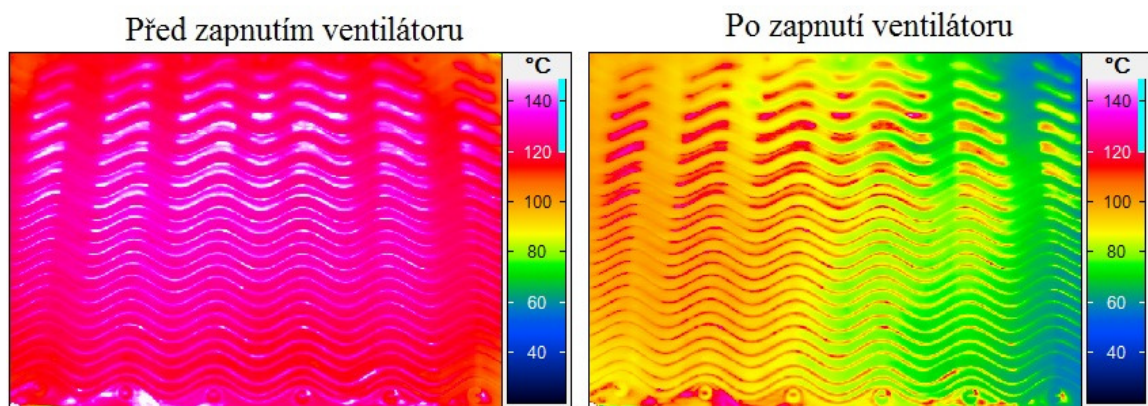
4.1.2 Režimy 90% výkonu keramického zářiče

5) 90% keramický zářič, 100% ventilátor



Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
120	23,0	24,2	1,2

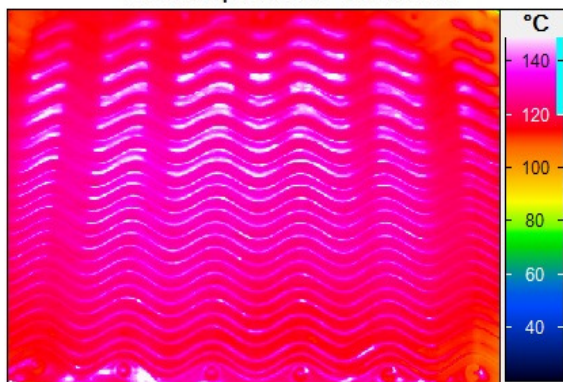
6) 90% keramický zářič, 70% ventilátor



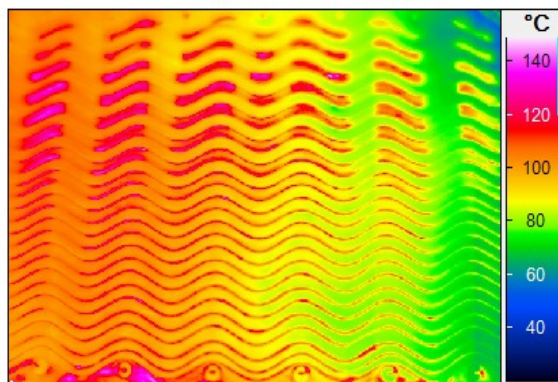
Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
105	23,0	25,2	2,2

7) 90% keramický zářič, 50% ventilátor

Před zapnutím ventilátoru



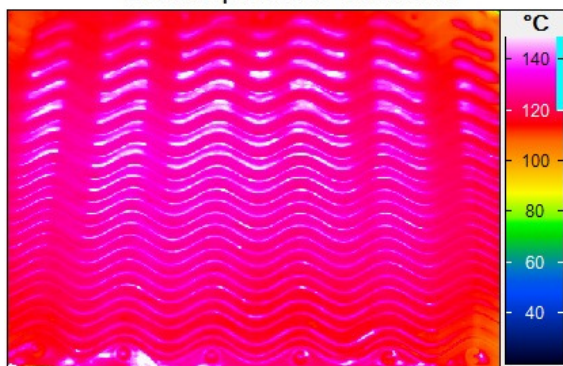
Po zapnutí ventilátoru



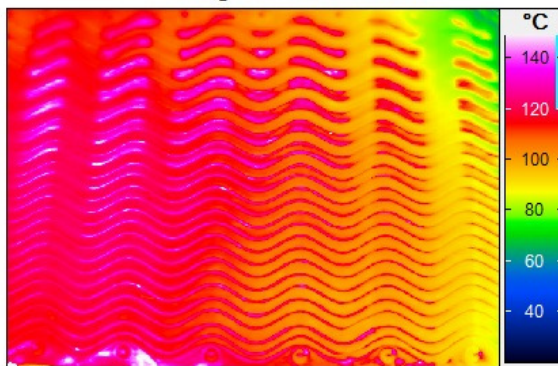
Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
100	23,0	26,1	3,1

8) 90% keramický zářič, 40% ventilátor

Před zapnutím ventilátoru



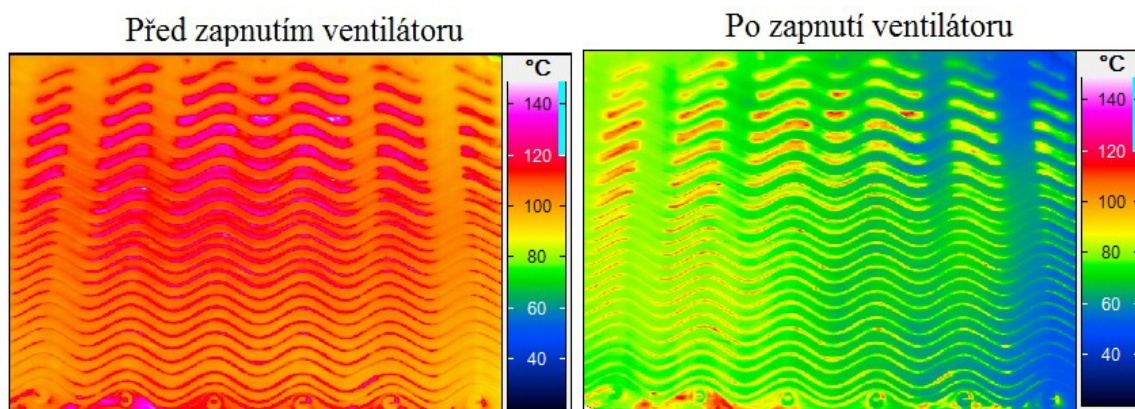
Po zapnutí ventilátoru



Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
85	23,0	36,1	13,1

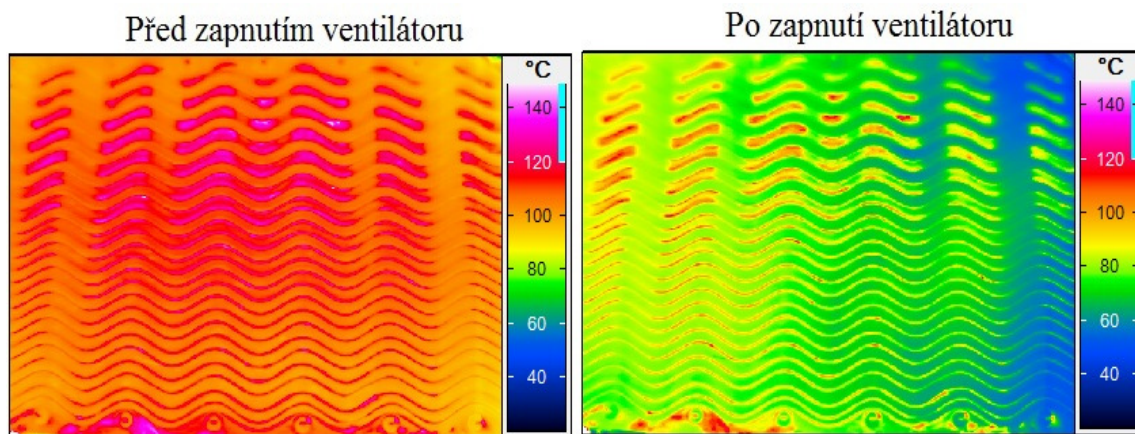
4.1.3 Režimy 80% výkonu keramického zářiče

9) 80% keramický zářič, 100% ventilátor



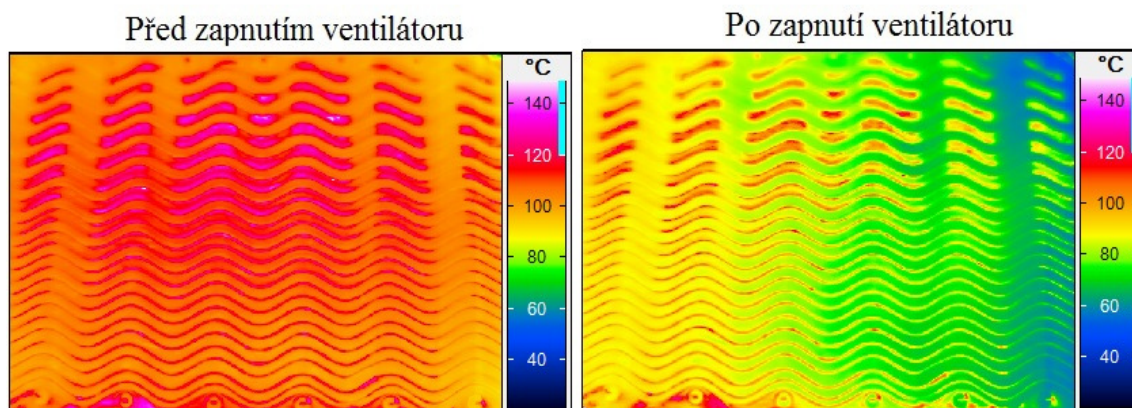
Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
115	23,0	24,0	1,0

10) 80% keramický zářič, 70% ventilátor



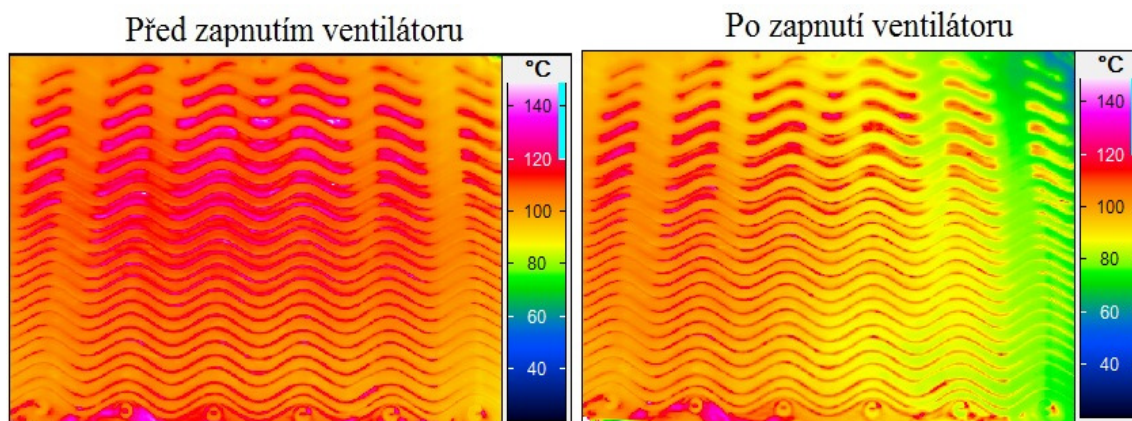
Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
100	23,0	24,0	1,0

11) 80% keramický zářič, 50% ventilátor



Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
95	23,0	24,2	1,2

12) 80% keramický zářič, 40% ventilátor

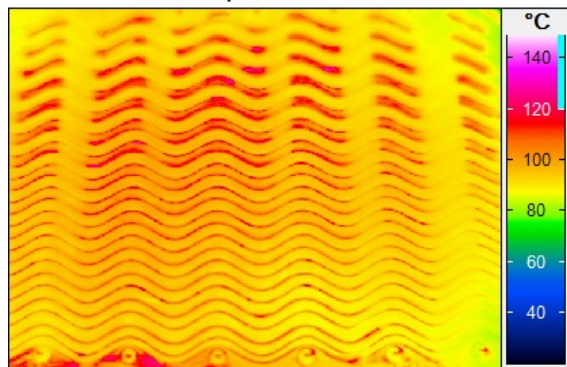


Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
85	23,0	33,9	10,9

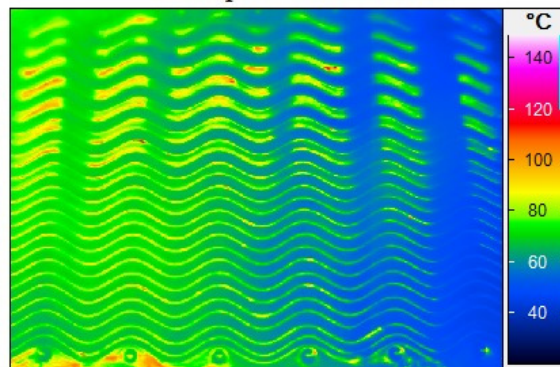
4.1.4 Režimy 70% výkonu keramického zářiče

13) 70% keramický zářič, 100% ventilátor

Před zapnutím ventilátoru



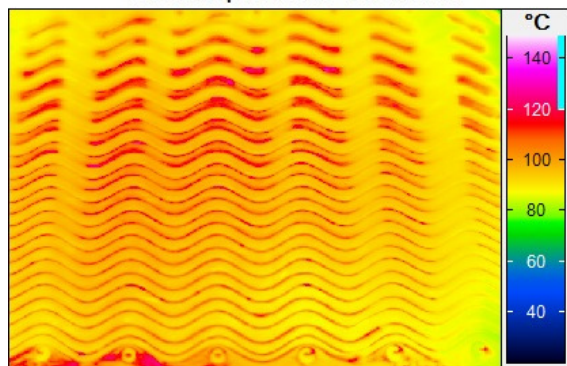
Po zapnutí ventilátoru



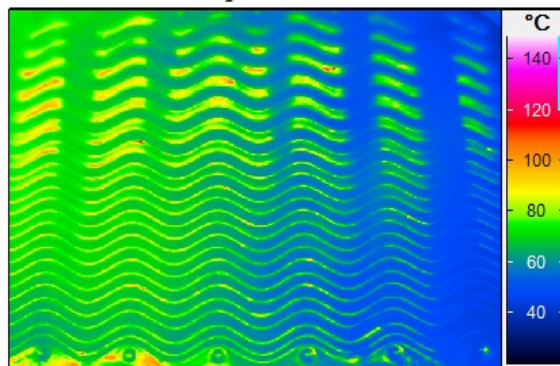
Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
75	23,0	23,8	0,8

14) 70% keramický zářič, 70% ventilátor

Před zapnutím ventilátoru

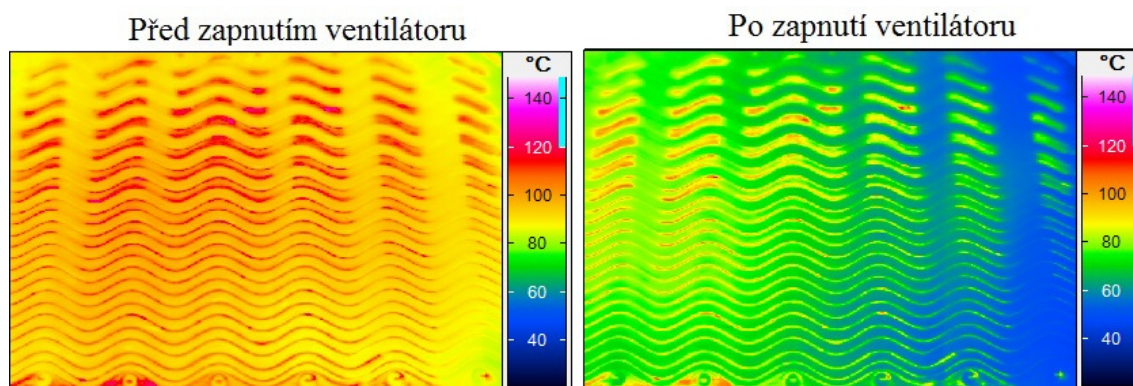


Po zapnutí ventilátoru



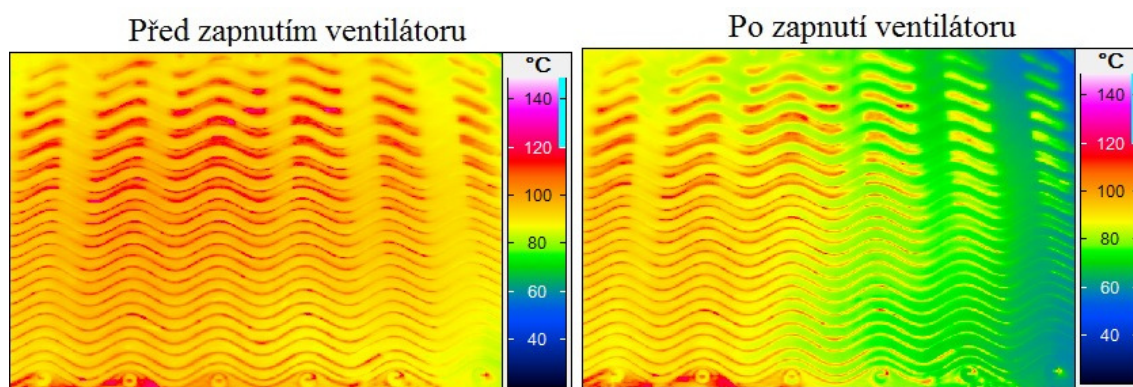
Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
80	23,0	24	1,0

15) 70% keramický zářič, 50% ventilátor



Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
90	23,0	24,7	1,7

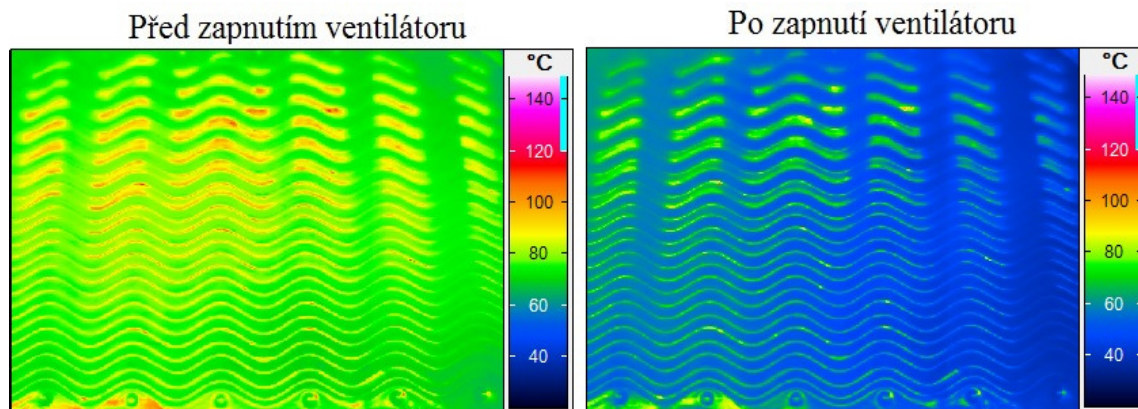
16) 70% keramický zářič, 40% ventilátor



Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
105	23,0	30,1	7,1

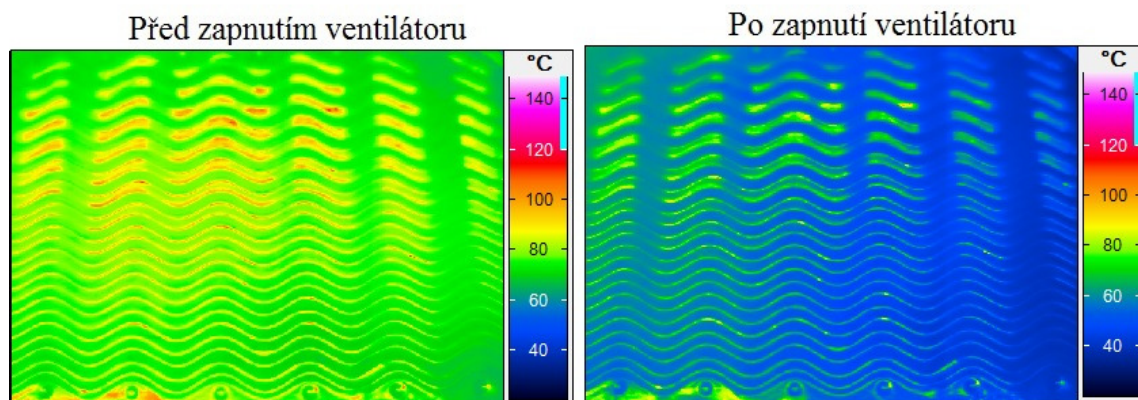
4.1.5 Režimy 60% výkonu keramického zářiče

17) 60% keramický zářič, 100% ventilátor



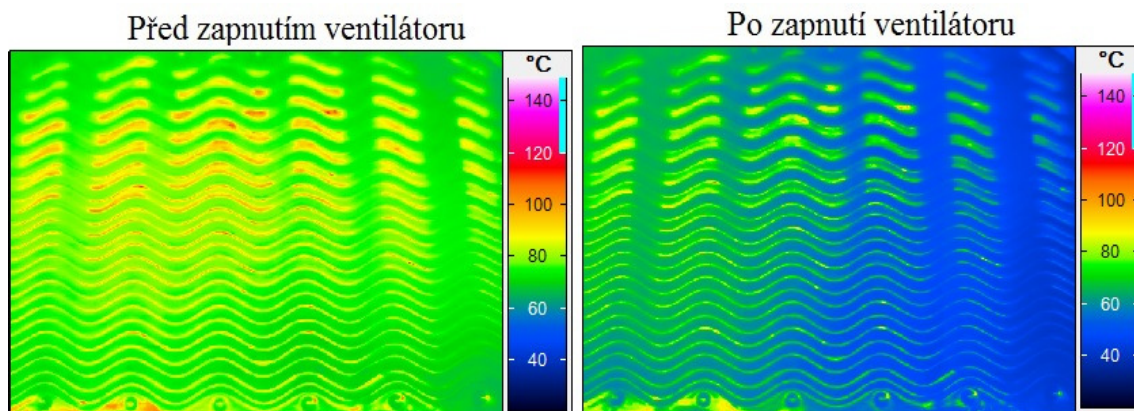
Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
70	23,0	23,7	0,7

18) 60% keramický zářič, 70% ventilátor



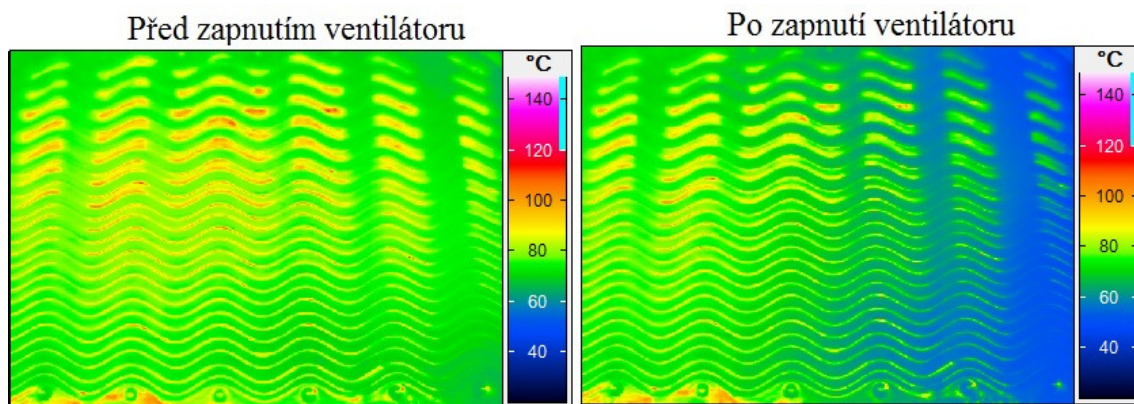
Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
80	23,0	23,8	0,8

19) 60% keramický zářič, 50% ventilátor



Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
90	23,0	24,4	1,4

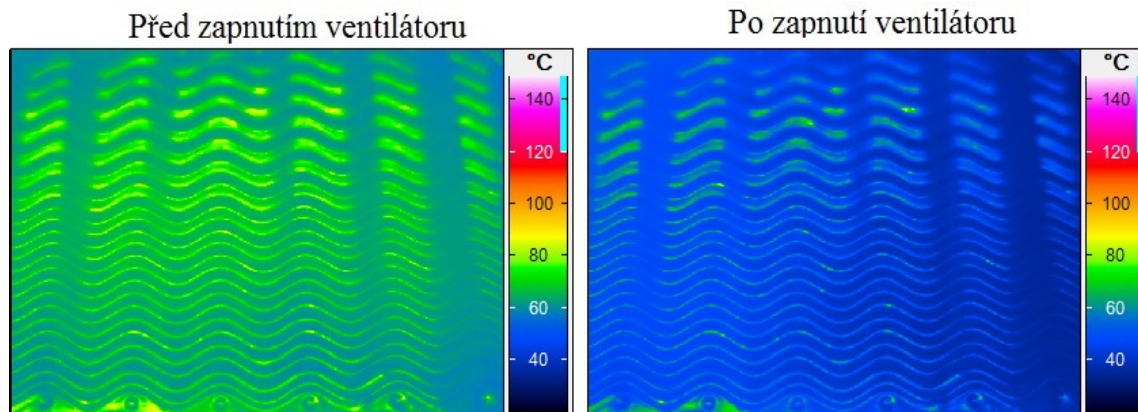
20) 60% keramický zářič, 40% ventilátor



Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
90	23,0	27,2	4,2

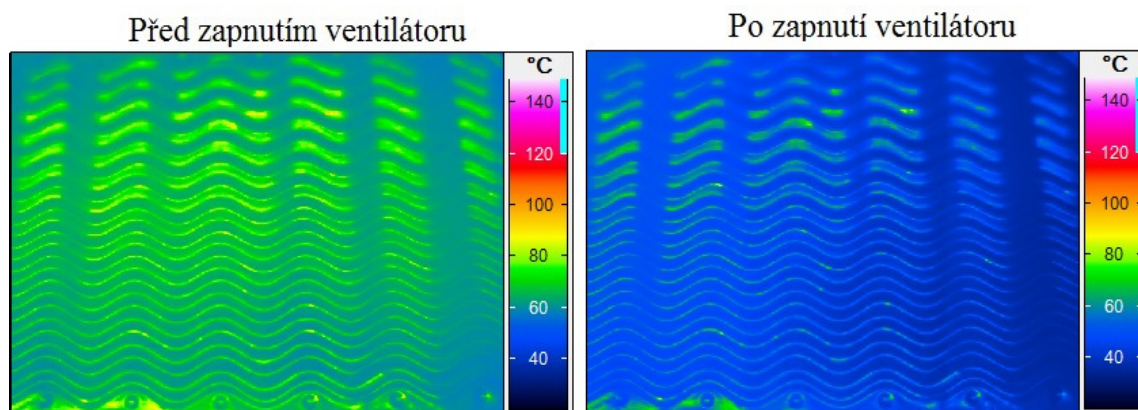
4.1.6 Režimy 50% výkonu keramického zářiče

21) 50% keramický zářič, 100% ventilátor



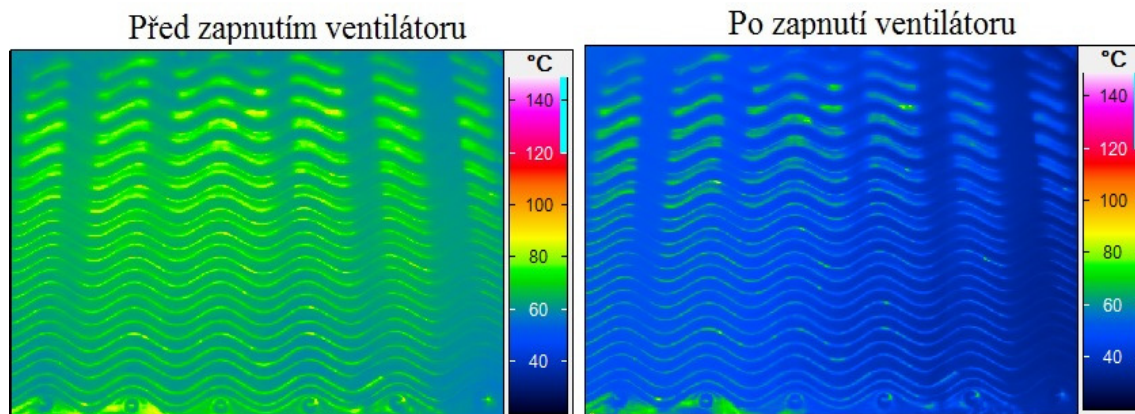
Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
50	23,0	23,5	0,5

22) 50% keramický zářič, 70% ventilátor



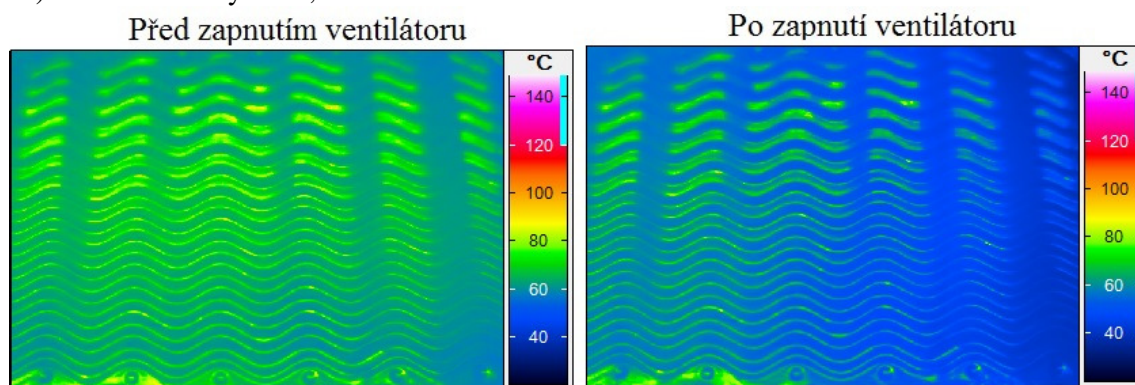
Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
50	23,0	23,6	0,6

23) 50% keramický zářič, 50% ventilátor



Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
60	23,0	24,2	1,2

24) 50% keramický zářič, 40% ventilátor



Čas od spuštění do ustálení (s)	Vstupní teplota vzduchu (°C)	Výstupní teplota vzduchu (°C)	Rozdíl vstupní a výstupní teploty (°C)
60	23,0	25,7	2,7

5 Vyhodnocení naměřených dat

Závěrečnou částí experimentu byla sumarizace dat a sestavení algoritmu pro jejich vyhodnocení. Hlavním úkolem bylo určit rozložení součinitele přestupu tepla na desce výměníku. Pro vyhodnocení byly sestaveny dva algoritmy. První algoritmus slouží pro rychlé a jednoduché vyhodnocení naměřených dat a pro získání prvotních informací o rozložení součinitele přestupu tepla. Pro přesnější určení rozložení součinitele přestupu tepla, včetně orientačních hodnot, byl sestaven složitější algoritmus uvažující tepelné děje na desce výměníku. Oba algoritmy jsou založeny na určení rozdílu teplot desky před a po chlazení. Počáteční teplota je tedy ustálená teplota desky při zapnutém ohřevu bez chlazení. Koncová teplota je ustálená teplota při zapnutém ohřevu a současném chlazení. Referenční teplotou je teplota desky bez ohřevu a bez chlazení.

5.1 První algoritmus pro vyhodnocení naměřených dat

Jelikož teplota na celém povrchu desky nebyla konstantní, bylo potřeba teplotní rozdíl vyhodnocovat v jednotlivých bodech desky (pixelech). Kamera použita v experimentu umožňuje měření v rozlišení 640x480 pixel. Maximální počet měřených bodů tedy odpovídá počtu pixelů kamery. Při experimentu byla nastavena vyhodnocovaná oblast o rozměrech 584x369 pixelů. Výsledný termografický snímek tedy obsahuje informaci o teplotě 215 496 bodů.

Rozložení součinitele přestupu tepla na desce je tedy v přímé vazbě k rozložení teploty. Čím vyšší je rozdíl teplot mezi počátečním a konečným stavem daného režimu, tím vyšší hodnota součinitele přestupu byla potřeba pro odvedení tepla.

Jelikož jsou objemy naměřených dat velké, byl pro vyhodnocení použit matematický software Matlab R2009b.

5.1.1 Jednotlivé kroky algoritmu

Prvním krokem byl export termogramů a jim příslušných ASCII map. ASCII mapa je v podstatě matice hodnot příslušných teplot. Na každý pixel připadá jedna hodnota teploty.

V softwaru Matlab R2009b byla vytvořena matice počátečních teplot (A). Matici byl nadefinován její rozměr, tedy počet sloupců a počet řádků (584x369). Následně byly do matice počátečních teplot importovány data z ASCII mapy na příslušné pozice. Stejným způsobem byla vytvořena i matice konečných teplot (B). Jelikož mají obě matice stejný rozměr, je možné je od sebe odečíst. Odečtením matice (B) od matice (A) získáme matici rozdílů teplot (C) mezi počátečním a koncovým stavem. Tato matice je v podstatě maticí rozložení součinitele přestupu tepla.

Vzhledem k velkým rozměrům matic, není možné uvést příkladný kompletní výpočet jednoho z režimů. Zjednodušil jsem tedy režim "100% ohřev a 100% chlazení". Pro vytvoření matice teplot byla použita každá padesátá hodnota.

Tabulka 4: Příklad matice teplot, 100% ohřev 0% chlazení (matice A)

126,6	127,1	131,7	134	133,9	133,4	132	131,3	130,4	128,3	123,8	121,8
127,4	138,7	134	136,6	137,8	134,5	160,5	134,2	141,6	134,5	128,1	139,3
135,1	139,8	139,8	143,2	154,2	142,2	151,9	139,1	143,5	138,3	133,4	130,5
140,3	147	149,9	150,5	153,6	145	151	142,9	147,4	142,8	139,8	133,6
141,3	159,6	146	147,1	149,7	144,9	147,4	143,7	144,7	143,9	140,9	135,9
137,2	138,6	141,6	145	145,4	144,1	147,9	141,6	152,2	142,3	140,9	134,7
133,4	138	143,1	151,8	149,7	153,4	135	136,5	136,3	141,2	135,8	138,2
135,7	128,6	135,4	136,3	136,1	140,5	142,3	144,1	145,9	147,7	149,5	151,3
138	136,2	136,9	145,2	139	146,4	149,6	152,8	156	159,2	152,5	155,7

Tabulka 5: Příklad matice teplo, 100% ohřev 100% chlazení (matice B)

110,9	106	103,6	100,5	97,3	91,6	87	88,7	80,8	64,1	60,8	52,5
102,8	109	99,2	95,9	95,4	88,7	125,5	84,3	88,8	62,8	78,6	54,4
106,5	106,7	102,8	100,6	120,5	91,5	115	80,9	87,9	70,2	67,5	70,1
107,8	118,5	113,5	122,9	112,5	98,3	105	86,5	88,7	78	66,9	72,7
107,5	114,1	105,4	112	103,5	94,8	93,5	86,1	84,7	75,1	64,4	68,4
105	103,9	103,3	103,6	101,4	93,7	89	84,9	87,5	74,1	63,3	62,6
102	103,5	106,3	113,3	113,7	114,5	83,6	89,3	76,2	69,5	72,8	67
102,6	93,9	99	98,7	96,4	89,5	87,7	82,2	86,9	75,5	60,1	58,2
106,2	101,1	109,1	129,8	113,1	107,2	98,2	84,8	102,2	68,2	61,2	60,1

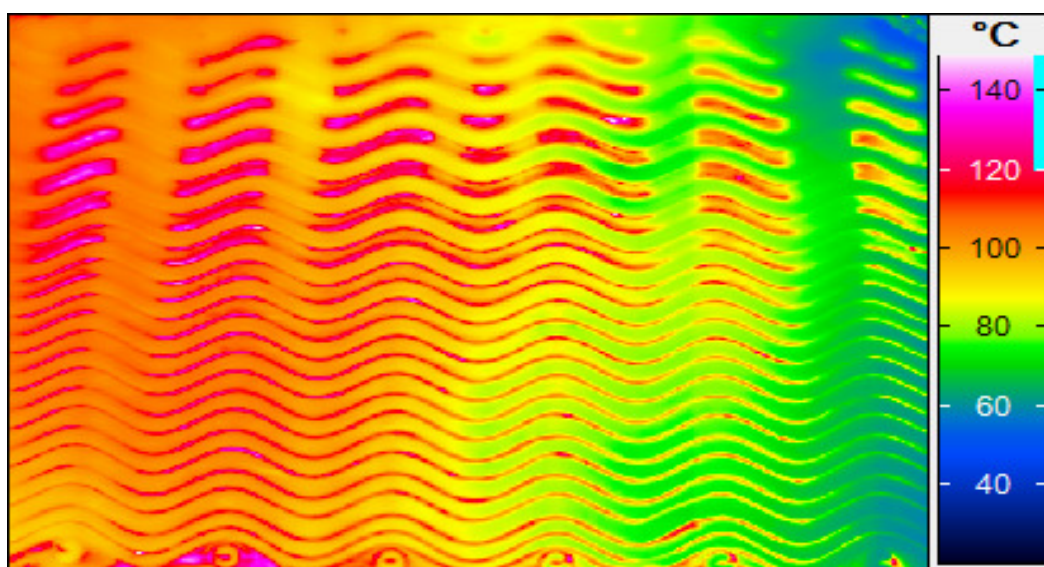
Tabulka 6: Příklad matice C, 100% ohřev, 100% chlazení

15,7	21,1	28,1	33,5	36,6	41,8	45	42,6	49,6	64,2	63	69,3
24,6	29,7	34,8	40,7	42,4	45,8	35	49,9	52,8	71,7	49,5	84,9
28,6	33,1	37	42,6	33,7	50,7	36,9	58,2	55,6	68,1	65,9	60,4
32,5	28,5	36,4	27,6	41,1	46,7	46	56,4	58,7	64,8	72,9	60,9
33,8	45,5	40,6	35,1	46,2	50,1	53,9	57,6	60	68,8	76,5	67,5
32,2	34,7	38,3	41,4	44	50,4	58,9	56,7	64,7	68,2	77,6	72,1
31,4	34,5	36,8	38,5	36	38,9	51,4	47,2	60,1	71,7	63	71,2
33,1	34,7	36,4	37,6	39,7	51	54,6	61,9	59	72,2	89,4	93,1
31,8	35,1	27,8	15,4	25,9	39,2	51,4	68	53,8	91	91,3	95,6

Z matice C je patrné, že největší teplotní rozdíly jsou na pravé straně matice. Ta odpovídá pravé straně výměníku. Na této straně je do výměníku přiváděn vzduch, a proto je zde chlazení nejintenzivnější. Směrem doleva se teplotní rozdíly snižují. To je dáno především ohřevem proudícího vzduchu při průchodu pravé části výměníku. Pro intenzivnější chlazení je zapotřebí vyšší hodnoty součinitele přestupu tepla. Matici teplotních rozdílů lze tedy považovat za matici rozložení součinitele přestupu tepla. Pro lepší orientaci je možné matici C znormovat dle maximální hodnoty. Dostaneme tak matici, kde maximální teplotní rozdíl bude odpovídat součiniteli přestupu tepla 1. Ostatní hodnoty součinitele přestupu tepla budou v intervalu (0-1), viz. normovaná matice součinitele přestupu tepla.

Tabulka 7: Matice rozložení součinitele přestupu tepla

0,22	0,29	0,35	0,38	0,44	0,47	0,45	0,52	0,67	0,66	0,72
0,31	0,36	0,43	0,44	0,48	0,37	0,52	0,55	0,75	0,52	0,89
0,35	0,39	0,45	0,35	0,53	0,39	0,61	0,58	0,71	0,69	0,63
0,30	0,38	0,29	0,43	0,49	0,48	0,59	0,61	0,68	0,76	0,64
0,48	0,42	0,37	0,48	0,52	0,56	0,60	0,63	0,72	0,80	0,71
0,36	0,40	0,43	0,46	0,53	0,62	0,59	0,68	0,71	0,81	0,75
0,36	0,38	0,40	0,38	0,41	0,54	0,49	0,63	0,75	0,66	0,74
0,36	0,38	0,39	0,42	0,53	0,57	0,65	0,62	0,78	0,94	0,97
0,37	0,29	0,16	0,27	0,41	0,54	0,71	0,56	0,95	0,96	1,00



Obrázek 26: Termogram režimu 100% ohřev, 100% chlazení

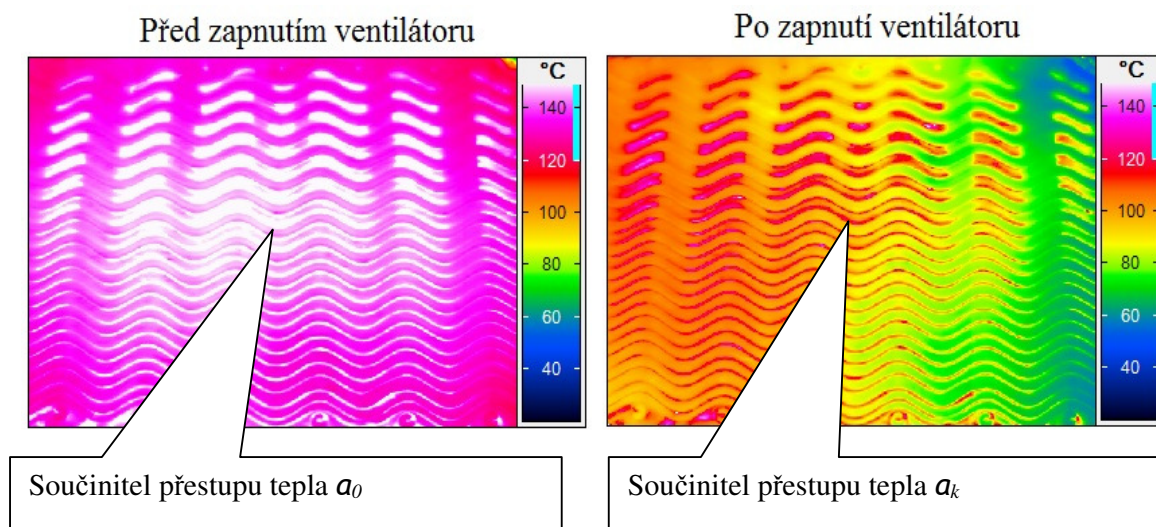
Z výsledné matice rozložení součinitele přestupu tepla a termogramu režimu 100% ohřev, 100% chlazení je patrné, že spolu velmi dobře korespondují. V místech, kde na termogramu je modrá barva se v matici objevují vysoké hodnoty součinitele přestupu tepla. Naopak v místech, která jsou na termogramu oranžová až červená, jsou hodnoty součinitele přestupu tepla výrazně menší. Lze tedy říci, že čím vyšší je teplotní rozdíl mezi počáteční a koncovou teplotou desky, tím vyšší je hodnota součinitele přestupu tepla.

5.2 Druhý algoritmus pro vyhodnocení naměřených dat

Tento algoritmus je založen na stejném základu jako algoritmus první. Vstupními hodnotami jsou tedy počáteční, koncová a referenční teplota desky. Odlišnost je však v celkovém přístupu k vyhodnocení naměřených dat. Především v tom, že jsou zde uvažovány tepelné děje na desce výměníku. Tedy konvekce do okolí, konvekce do proudícího vzduchu, vedení v místě dotyku sousedních desek a samotný radiální ohřev desky. Výsledkem není pouze mapa rozložení součinitele přestupu tepla jako v prvním algoritmu, ale získáme konkrétní hodnoty součinitele přestupu tepla. V následujícím textu je popsán matematický model experimentu včetně použitých zjednodušení.

5.2.1 Součinitel přestupu tepla při volné konvekci

Prvním krokem bylo určení součinitele přestupu tepla při volné konvekci na vnější straně desky, pro počáteční stav a_0 a koncový stav a_k . Počáteční teplota zůstává stejná vždy pro daný režim ohřevu (100% ohřev, 90% ohřev, 80% ohřev, 70% ohřev, atd.). Koncová teplota se však mění pro každý režim ohřevu i pro každý režim chlazení. Součinitel přestupu tepla a_k na vnější straně desky je tedy potřeba vyhodnotit pro každý z 24 režimů. Jako příklad uvádím výpočet pro režim 100% ohřev, 100% chlazení. Tedy součinitel přestupu tepla a_0 je při maximální teplotě desky a vypnutém chlazení. Součinitel přestupu tepla a_k je při současném provozu ohřevu i chlazení na 100%.



Střední teplota zahřáté desky byla stanovena v softwaru IRBIS 3 Professional na $t_s=142^\circ\text{C}$.

Teplota okolí byla měřena externím teploměrem v dostatečné vzdálenosti od zářiče $t_i=23^\circ\text{C}$.

$$t_{char} = \frac{t_s - t_i}{2} = \frac{142 - 23}{2} = 59,5 \cong 60 \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.1)$$

Při volné konvekci je Nusseltovo číslo závislé na čísle Grashofově a Prandtlově. [36]

Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci 100% ohřev, 0% chlazení						
$t_{str} (^\circ\text{C})$	$\beta (1\cdot\text{K}^{-1})$	$\Delta T (\text{K})$	$\nu (\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	Pr (1)	$\lambda (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\alpha_0 (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$
142	$3,0\cdot 10^{-3}$	119	$18,95\cdot 10^{-6}$	0,71	0,0285	7,69

$$Gr = \frac{g \cdot L_{char}^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 0,16^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot (142 - 23)}{(18,95 \cdot 10^{-6})^2} = 3,9950 \cdot 10^7 \quad (1) \quad (5.2)$$

$$Nu = f(Gr \cdot Pr)$$

$$Gr \cdot Pr = 3,9950 \cdot 10^7 \cdot 0,71 = 2,8365 \cdot 10^7 \Rightarrow Nu = 0,15 \cdot Pr^{0,33} \cdot Gr^{0,33} \quad (5.3)$$

$$Nu = 43,2 \quad (1)$$

$$Nu = \frac{\alpha_0 \cdot L_{char}}{\lambda} \Rightarrow \alpha_0 = \frac{Nu \cdot \lambda}{L_{char}} = \frac{43,2 \cdot 0,0285}{0,16} = \underline{\underline{7,69 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})}} \quad (5.4)$$

Součinitel přestupu tepla na vnější straně desky výměníku je tedy $\alpha_0 = 7,69 (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$.

Střední teplota desky při chlazení byla stanovena v softwaru IRBIS 3 Professional na $t_s=93^\circ\text{C}$.

Teplota okolí byla měřena externím teploměrem v dostatečné vzdálenosti od zářiče $t_t=23^\circ\text{C}$.

$$t_{char} = \frac{t_s - t_t}{2} = \frac{93 - 23}{2} = 35 \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.5)$$

Při volné konvekci je Nusseltovo číslo závislé na čísle Grashofově a Prandtlově. [36]

Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci 100% ohřev, 100% chlazení						
$t_{str} (^\circ\text{C})$	$\beta (1\cdot\text{K}^{-1})$	$\Delta T (\text{K})$	$\nu (\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	Pr (1)	$\lambda (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\alpha_k (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$
93	$3,26\cdot 10^{-3}$	70	$16,526\cdot 10^{-6}$	0,71	0,02665	6,79

$$Gr = \frac{g \cdot L_{char}^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 0,16^3 \cdot 3,26 \cdot 10^{-3} \cdot (93 - 23)}{(16,526 \cdot 10^{-6})^2} = 3,3574 \cdot 10^7 \quad (1) \quad (5.6)$$

$$Nu = f(Gr \cdot Pr)$$

$$Gr \cdot Pr = 3,3574 \cdot 10^7 \cdot 0,71 = 2,3837 \cdot 10^7 \Rightarrow Nu = 0,15 \cdot Pr^{0,33} \cdot Gr^{0,33} \quad (5.7)$$

$$Nu = 40,79 \quad (1)$$

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot L_{char}}{\lambda} \Rightarrow \alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{L_{char}} = \frac{40,79 \cdot 0,02665}{0,16} = \underline{\underline{6,79}} \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}) \quad (5.8)$$

Součinitel přestupu tepla při spuštěném chlazení je tedy nižší než součinitel přestupu tepla při vypnutém chlazení. To je způsobeno především nižším teplotním rozdílem mezi střední teplotou desky a teplotou okolí. Důležité je však zdůraznit, že uvažování střední teploty desky při zapnutém chlazení je značně nepřesné. V pravé části desky jsou výrazně nižší teploty než na straně levé.

5.2.2 Tepelná bilance na desce výměníku

Pro popis tepelných dějů na desce výměníku bylo nutné provést tepelnou bilanci. Nejprve byla udělána korekce pro emisivitu, ta byla následně použita pro korekci teplot. Tato korekce je nutná z důvodu nekonstantní hodnoty emisivity na povrchu desky. Rozdílná emisivita je dána profilem desky a úhlem, pod kterým termokamera desku snímá. Pro výpočet korekce byla nastavena hodnota součinitele ozáření $F=1$. Součin $\varepsilon \cdot F$ byl korekcí upraven na skutečnou hodnotu $(\varepsilon \cdot F)_x$.

$$E = \varepsilon \cdot F \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (5.2.1)$$

kde E je vyzařovaná energie, ε je emisivita, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$ je Stefan-Boltzmanova konstanta a T je termodynamická teplota.

$$E(x) = (\varepsilon \cdot F) \cdot \sigma \cdot T^4(x) \quad (5.2.2)$$

Veličiny označené indexem x jsou vázané k libovolnému bodu desky.

$$E_R(x) = (\varepsilon \cdot F)_x \cdot \sigma \cdot T_0^4 \quad (5.2.3)$$

$E_R(x)$ je referenční vyzařovaná energie nezahřívané desky, T_0 je teplota nezahřívané desky.

$$1 = \frac{(\varepsilon \cdot F)}{(\varepsilon \cdot F)_x} \cdot \frac{T^4(x)}{T_0^4} \quad (5.2.4)$$

Následující vztah je korekce emisivity. Touto korekcí byly upraveny také měřené teploty.

$$(\varepsilon \cdot F)_x = (\varepsilon \cdot F) \cdot \frac{T^4(x)}{T_0^4} \quad (5.2.5)$$

Korekce naměřených teplot

$$E(x) = (\varepsilon \cdot F) \cdot \sigma \cdot T_M^4(x), \quad (5.2.6)$$

kde T_M je teplota naměřená termokamerou.

$$E_M(x) = (E \cdot F)_x \cdot \sigma \cdot T_S^4(x) \quad (5.2.7)$$

T_S je skutečná, tedy zkorigovaná teplota desky.

$$1 = \frac{(E \cdot F)}{(E \cdot F)_x} \cdot \frac{T_M(x)}{T_S(x)} \quad (5.2.8)$$

Následující vztah popisuje výpočet skutečné teploty $T_S(x)$

$$T_S(x) = \frac{(E \cdot F)}{(E \cdot F)_x} \cdot T_M(x) \quad (5.2.9)$$

Po vypočtení korekce naměřených teplot bylo možné přistoupit k samotné tepelné bilanci na desce výměníku. Situace je schematicky popsána na obrázku níže.



Obrázek 27: Schéma tepelné bilance na desce výměníku

Na schématu jsou zobrazeny jednotlivé tepelné toky na desce. $q(x)$ je teplo dodané radičním zářičem, q_{od} je teplo odvedené volnou konvekcí. Výpočet součinitele přestupu tepla pro tuto konvekci je uveden v kapitole 5.2.1. q_{pr} je teplo odvedené nucenou konvekcí způsobenou proudícím vzduchem mezi deskami. Určení součinitele přestupu tepla pro tuto konvekci je předmětem celého algoritmu. q_v je teplo odvedené vedením v místech styku dvou desek výměníku.

Rovnice tepelné bilance byla sestavena pro dva stavy. Prvním byl stav ohřáté desky bez proudícího vzduchu. Jednotlivé členy pro tento stav jsou označeny I.

$$q(x) = q_{odI}(x) + q_{prI}(x) + q_{vl}(x) \quad (5.2.10)$$

$$q_{odI}(x) = \alpha_0 \cdot (T_{SI}(x) - T_\infty) \quad (5.2.11)$$

$$q_{prI}(x) = \alpha_{il} \cdot (T_{SI}(x) - T_{a1}) \quad (5.2.12)$$

T_{a1} je teplota vzduchu mezi deskami. V tomto případě vzduch neproudí, tudíž má stejnou teplotu jako deska T_{SI} . q_{prI} tedy bude nulové.

$$q_{vl}(x) = S \cdot (T_{SI}(x) - T_\infty) \Rightarrow q_{vl}(x) = 0 \quad (5.2.13)$$

$q_{vl}(x)$ je rovno 0, jelikož se jedná o izolovaný výměník v krabici z polystyrenu. Ve skutečnosti však přenos tepla vedením nulový není. Jedná se o další zjednodušení výpočtu.

Druhým stavem pro tepelnou bilanci byl stav, kdy je deska z vnějšku ohřívána a zároveň z vnitřku chlazena proudícím vzduchem. Jednotlivé členy pro tento stav jsou označeny II.

$$q(x) = q_{odII}(x) + q_{prII}(x) + q_{vII}(x) \quad (5.2.14)$$

$$q_{odII}(x) = \alpha_k \cdot (T_{SII}(x) - T_\infty) \quad (5.2.15)$$

$$q_{prII}(x) = \alpha_{iII} \cdot (T_{SII}(x) - T_{a2}) \quad (5.2.16)$$

T_{a2} je teplota proudícího vzduchu mezi deskami. V tomto případě má proudící vzduch stejnou teplotu jako je teplota okolí tedy $T_{a2} = T_\infty$.

$$q_{vII}(x) = S \cdot (T_{SII}(x) - T_\infty) \Rightarrow q_{vII}(x) = 0 \quad (5.2.17)$$

$q_{vII}(x)$ je stejně jako $q_{vI}(x)$ rovno 0, jelikož se jedná o izolovaný výměník v krabici z polystyrenu.

Porovnáním rovnic (5.2.10) a (5.2.14) získáme vstupní rovnici pro výpočet součinitele přestupu tepla α_{III} .

$$q(x) = q_{odI}(x) + q_{prI}(x) + q_{vI}(x) = q_{odII}(x) + q_{prII}(x) + q_{vII}(x) \quad (5.2.18)$$

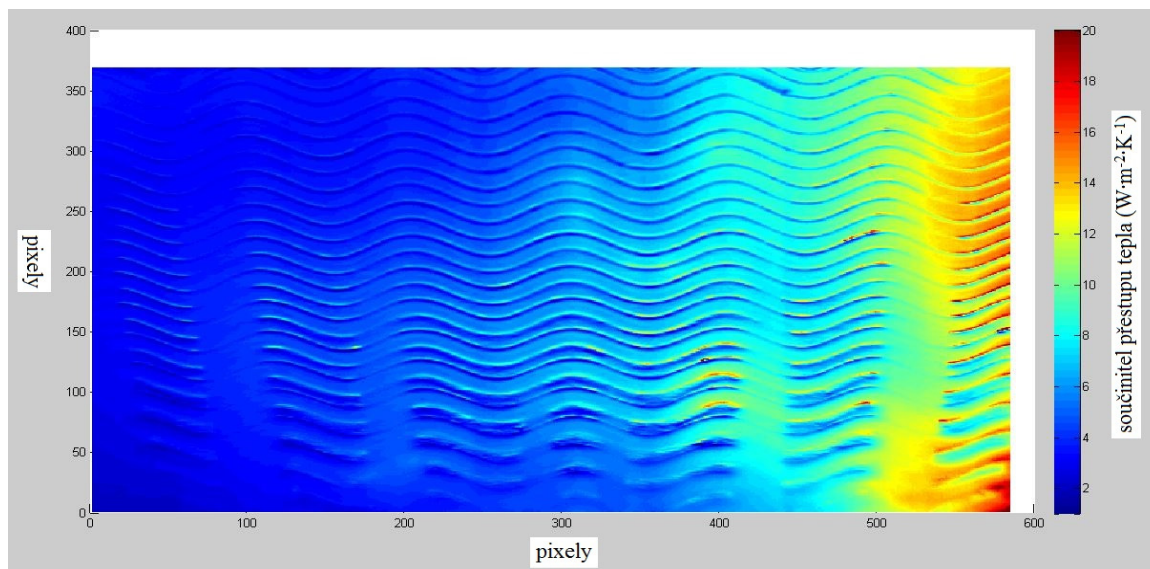
Po dosazení všech definičních vztahů a zjednodušení dostaneme následující rovnici.

$$\alpha_0 \cdot (T_{SI}(x) - T_\infty) = \alpha_k \cdot (T_{SII}(x) - T_\infty) + \alpha_{III} \cdot (T_{SII}(x) - T_{a2}) \quad (5.2.19)$$

$$\alpha_{III} = \frac{\alpha_0 \cdot (T_{SI}(x) - T_\infty) - \alpha_k \cdot (T_{SII}(x) - T_\infty)}{(T_{SII}(x) - T_{a2})} \quad (5.2.20)$$

Rovnice (5.2.20) je konečným vztahem pro výpočet rozložení součinitele přestupu tepla na desce výměníku. Všechny rovnice popsané v tomto algoritmu byly naprogramovány v softwaru Matlab R2009b. Program je sestaven tak, že stačí pouze vytvořit v programu IRBIS 3 Professional matice teplot pro dané režimy a vše ostatní už dopočítá Matlab. Výstupem z výpočtu je barevná mapa rozložení součinitele přestupu tepla.

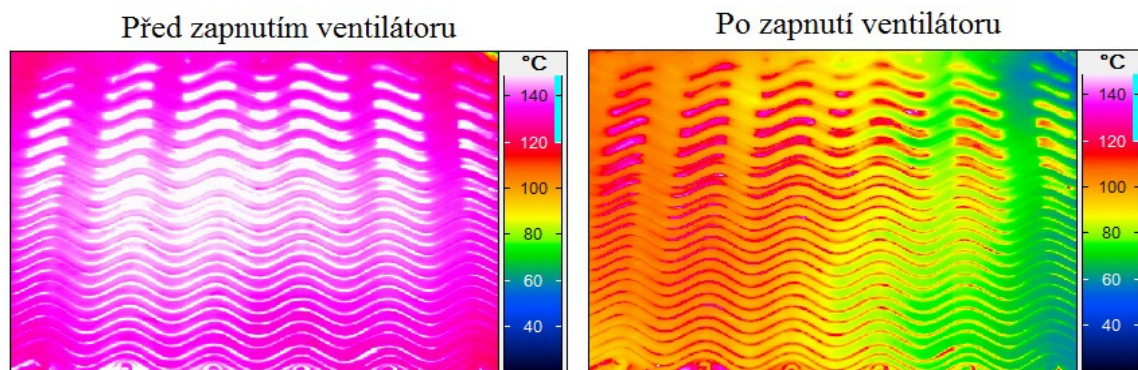
V kapitole 5.2.1 byl uveden výpočet součinitele přestupu tepla pro volnou konvekci. Jako příklad byl použit režim 100% ohřev, 100% chlazení. Zde uvádím mapu rozložení součinitele přestupu tepla právě pro tento režim.



Obrázek 28: Rozložení součinitele přestupu tepla pro režim 100% ohřev, 100% chlazení.

5.2.3 Rekapitulace vypočtených dat pro režim 100% ohřev, 100% chlazení.

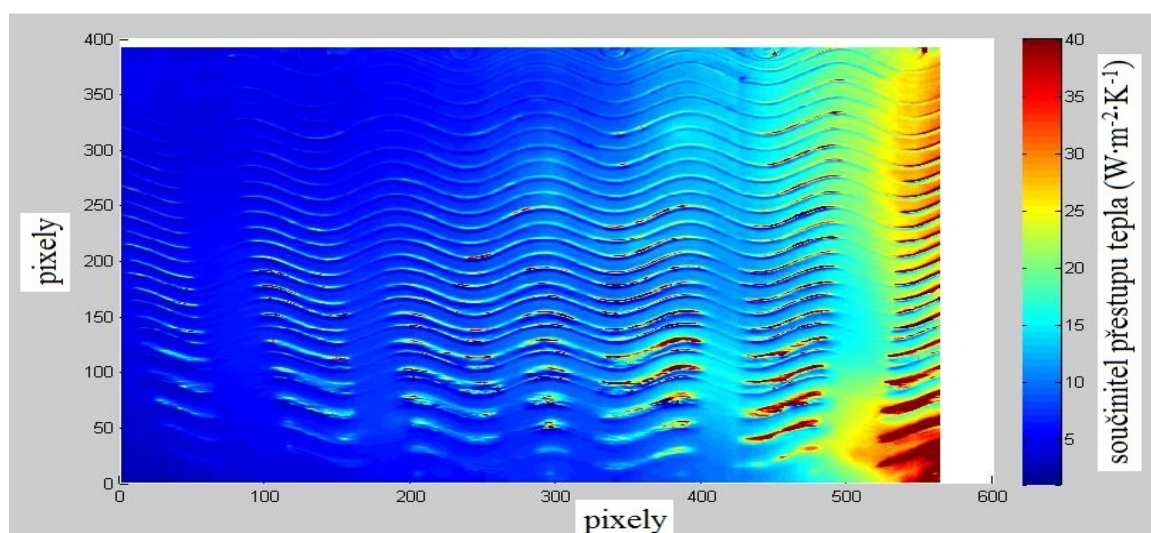
1) Termogramy ustálených stavů, vyexportované ze softwaru IRBIS 3.



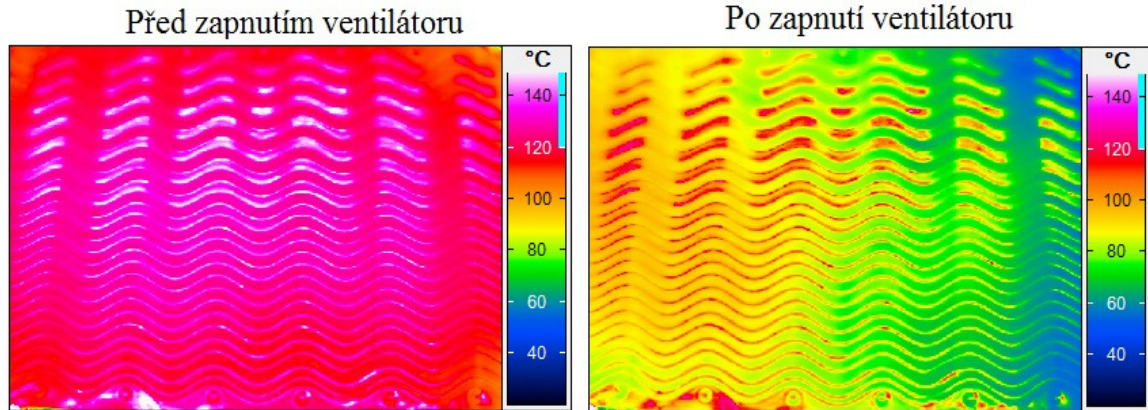
2) Normovaná mapa rozložení součinitele přestupu tepla, jako výsledek při použití prvního algoritmu pro vyhodnocení součinitele přestupu tepla.

0,22	0,29	0,35	0,38	0,44	0,47	0,45	0,52	0,67	0,66	0,72
0,31	0,36	0,43	0,44	0,48	0,37	0,52	0,55	0,75	0,52	0,89
0,35	0,39	0,45	0,35	0,53	0,39	0,61	0,58	0,71	0,69	0,63
0,30	0,38	0,29	0,43	0,49	0,48	0,59	0,61	0,68	0,76	0,64
0,48	0,42	0,37	0,48	0,52	0,56	0,60	0,63	0,72	0,80	0,71
0,36	0,40	0,43	0,46	0,53	0,62	0,59	0,68	0,71	0,81	0,75
0,36	0,38	0,40	0,38	0,41	0,54	0,49	0,63	0,75	0,66	0,74
0,36	0,38	0,39	0,42	0,53	0,57	0,65	0,62	0,78	0,94	0,97
0,37	0,29	0,16	0,27	0,41	0,54	0,71	0,56	0,95	0,96	1,00

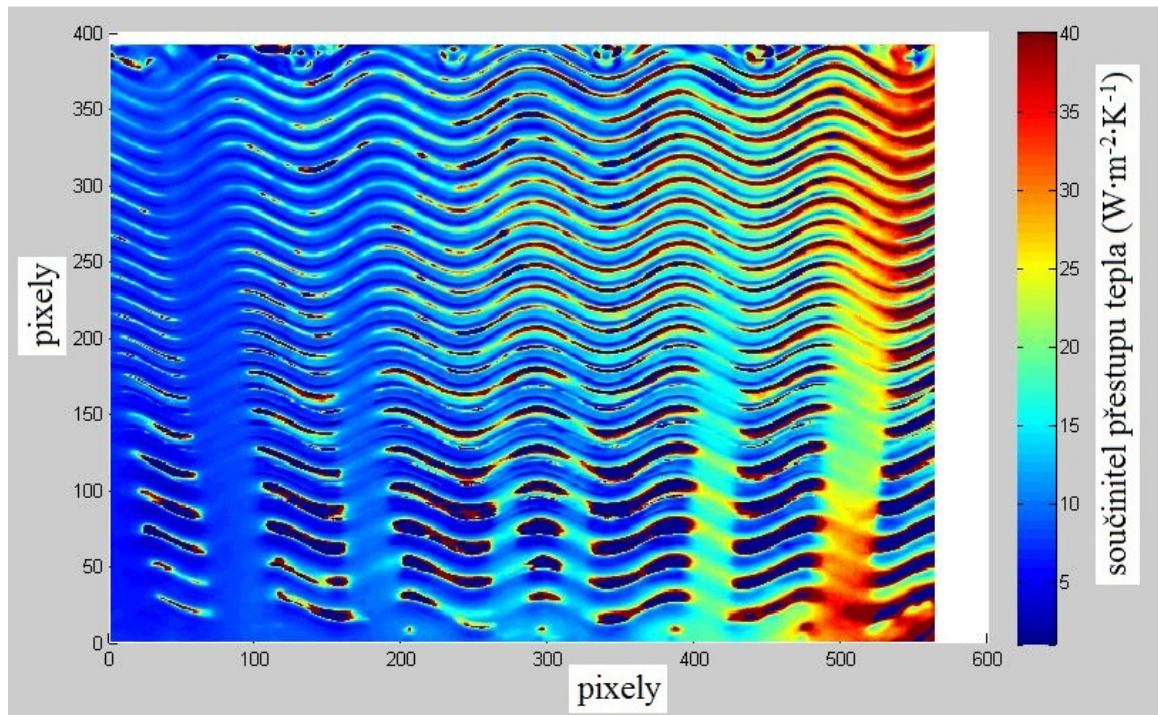
3) Mapa rozložení součinitele přestupu tepla, jako výsledek při použití druhého algoritmu pro vyhodnocení součinitele přestupu tepla.



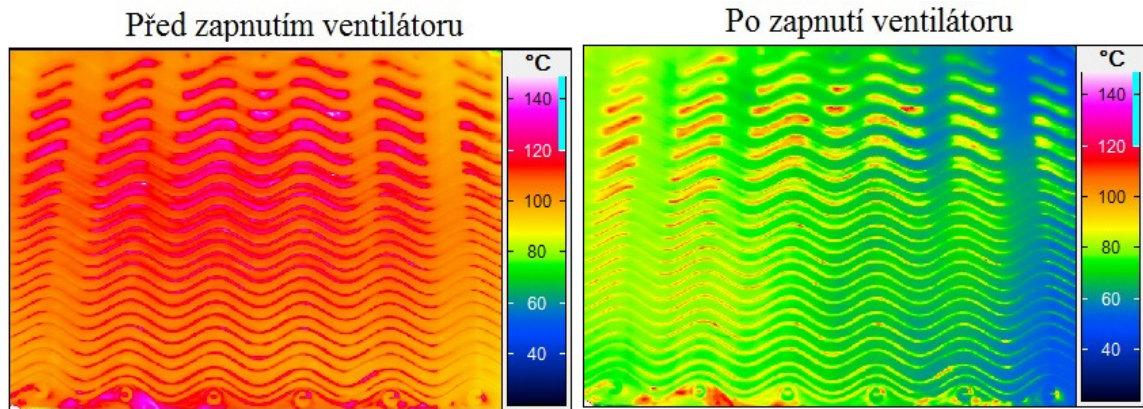
5.2.4 90% ohřev, 100% chlazení



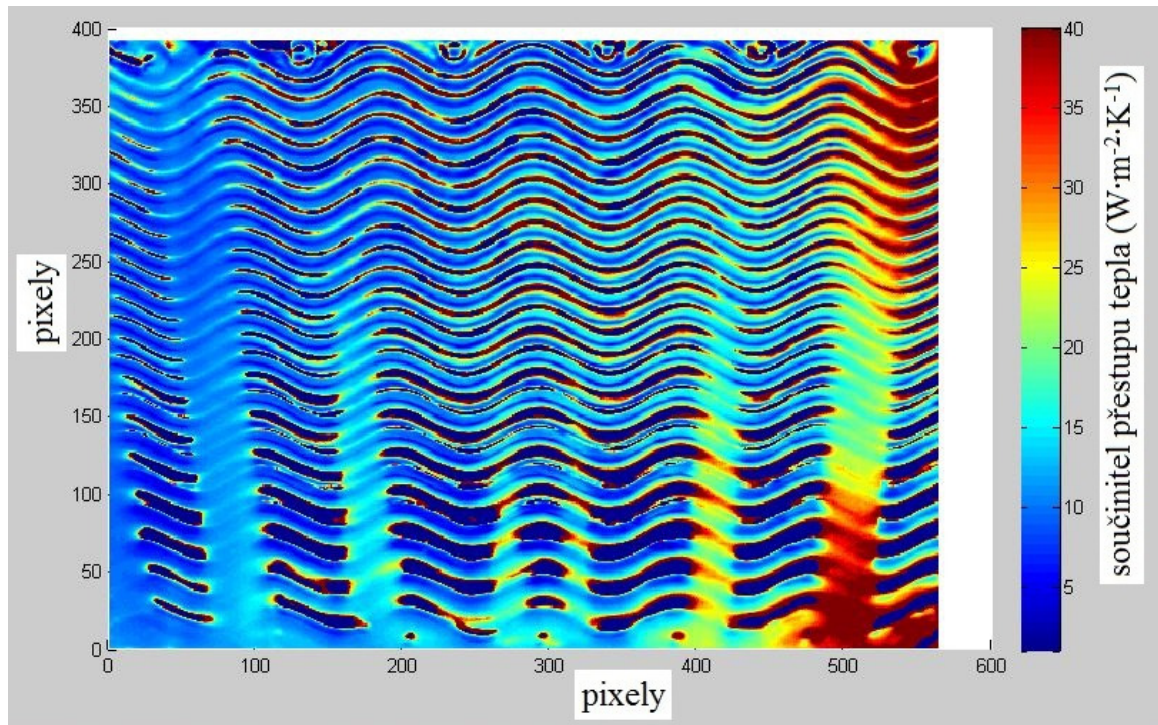
Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci 90% ohřev, 0% chlazení						
t_{str} (°C)	β (1·K ⁻¹)	ΔT (K)	v (m ² ·s ⁻¹)	Pr (1)	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	α_0 (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
126	$3,1 \cdot 10^{-3}$	103	$17,973 \cdot 10^{-6}$	0,71	0,02775	7,48
Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci 90% ohřev, 100% chlazení						
t_{str} (°C)	β (1·K ⁻¹)	ΔT (K)	v (m ² ·s ⁻¹)	Pr (1)	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	α_k (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
83	$3,32 \cdot 10^{-3}$	60	$16,056 \cdot 10^{-6}$	0,71	0,0263	6,53



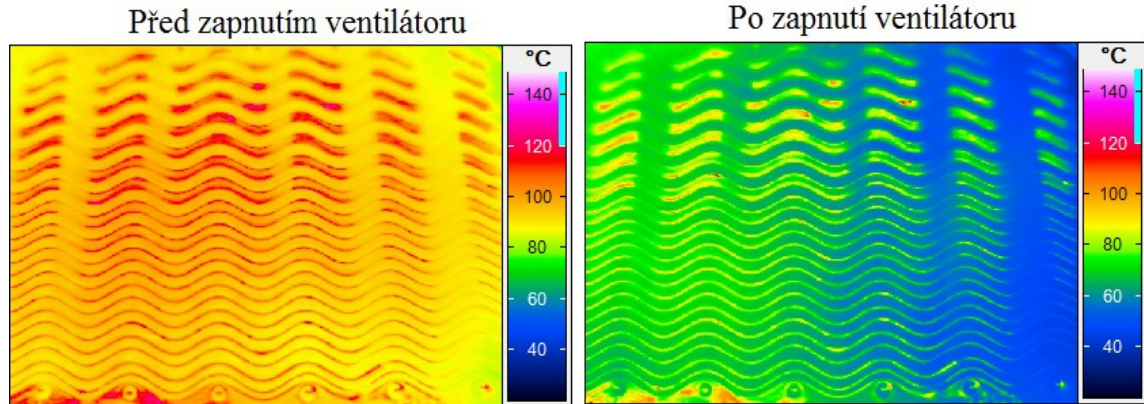
5.2.5 80% ohřev, 100% chlazení



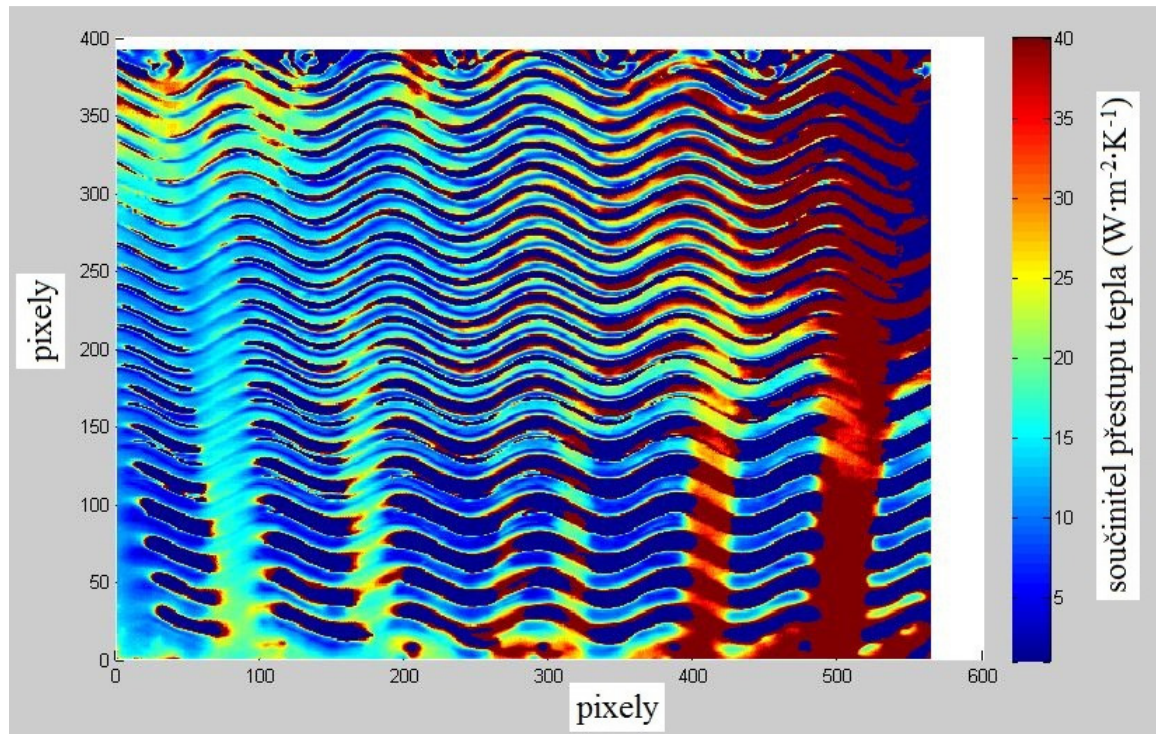
Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci 80% ohřev, 0% chlazení						
t_{str} (°C)	β (1·K ⁻¹)	ΔT (K)	ν (m ² ·s ⁻¹)	Pr (1)	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	α_0 (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
109	$3,15 \cdot 10^{-3}$	86	$17,485 \cdot 10^{-6}$	0,71	0,0274	7,12
Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci 80% ohřev, 100% chlazení						
t_{char} (°C)	β (1·K ⁻¹)	ΔT (K)	ν (m ² ·s ⁻¹)	Pr (1)	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	α_k (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
73	$3,37 \cdot 10^{-3}$	50	$15,856 \cdot 10^{-6}$	0,71	0,0259	6,22



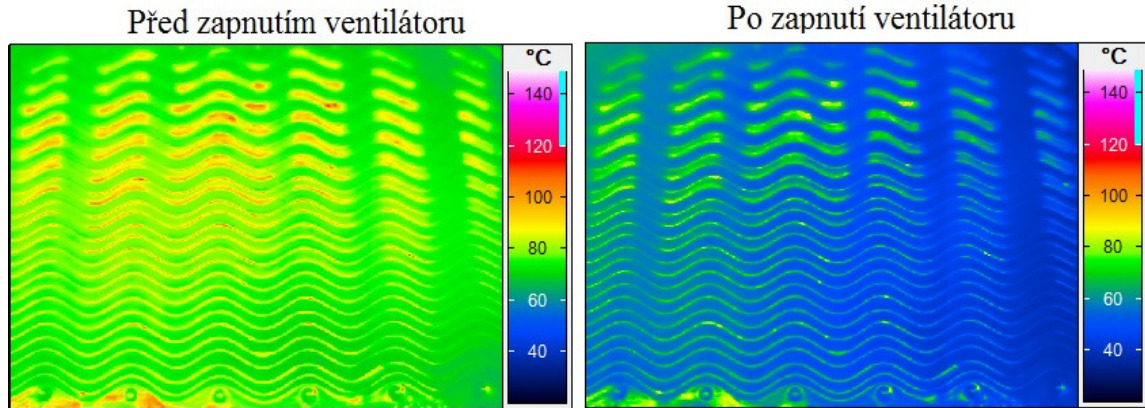
5.2.6 70% ohřev, 100% chlazení



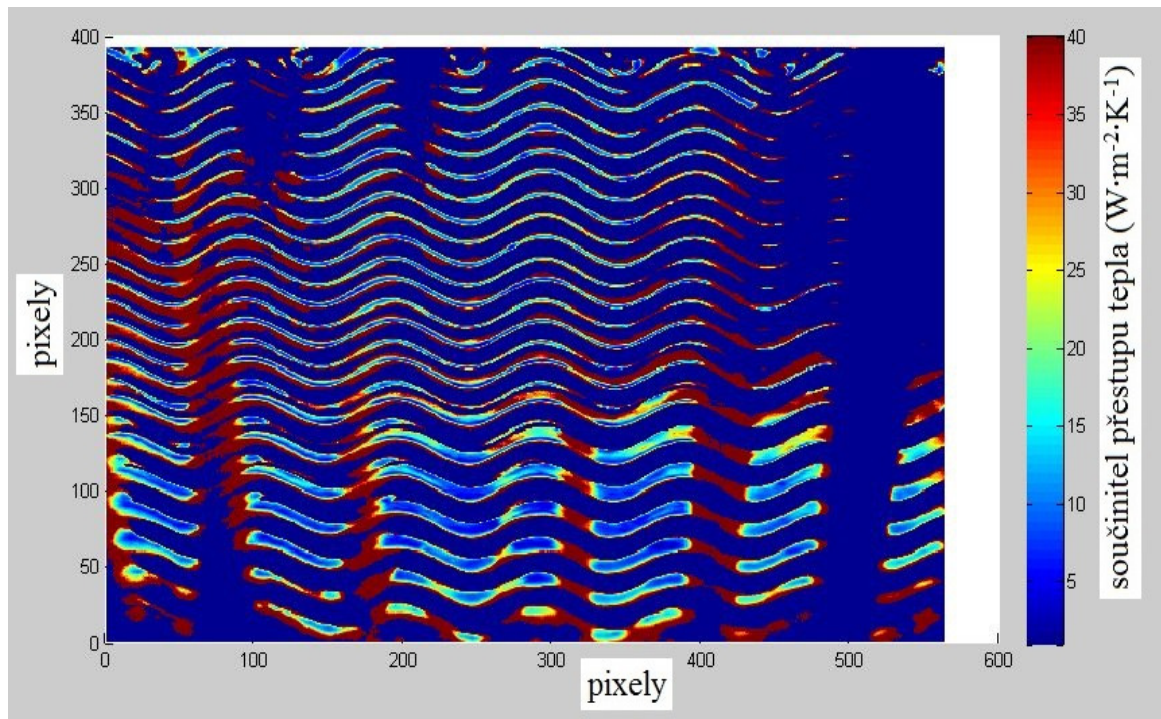
Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci 70% ohřev, 0% chlazení						
$t_{str} (°C)$	$\beta (1 \cdot K^{-1})$	$\Delta T (K)$	$\nu (m^2 \cdot s^{-1})$	Pr (1)	$\lambda (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$\alpha_0 (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
97	$3,2 \cdot 10^{-3}$	74	$16,997 \cdot 10^{-6}$	0,71	0,027	6,84
Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci 70% ohřev, 100% chlazení						
$t_{str} (°C)$	$\beta (1 \cdot K^{-1})$	$\Delta T (K)$	$\nu (m^2 \cdot s^{-1})$	Pr (1)	$\lambda (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$\alpha_k (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
63	$3,43 \cdot 10^{-3}$	40	$15,116 \cdot 10^{-6}$	0,71	0,0256	5,85



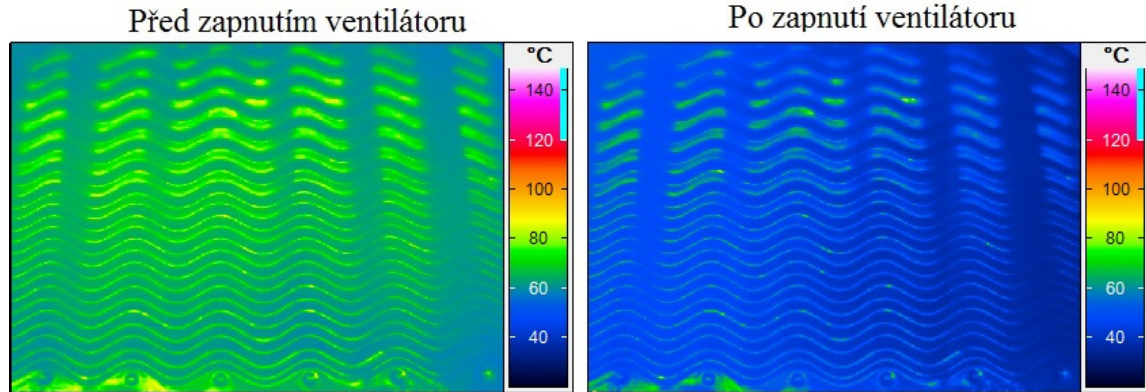
5.2.7 60% ohřev, 100% chlazení



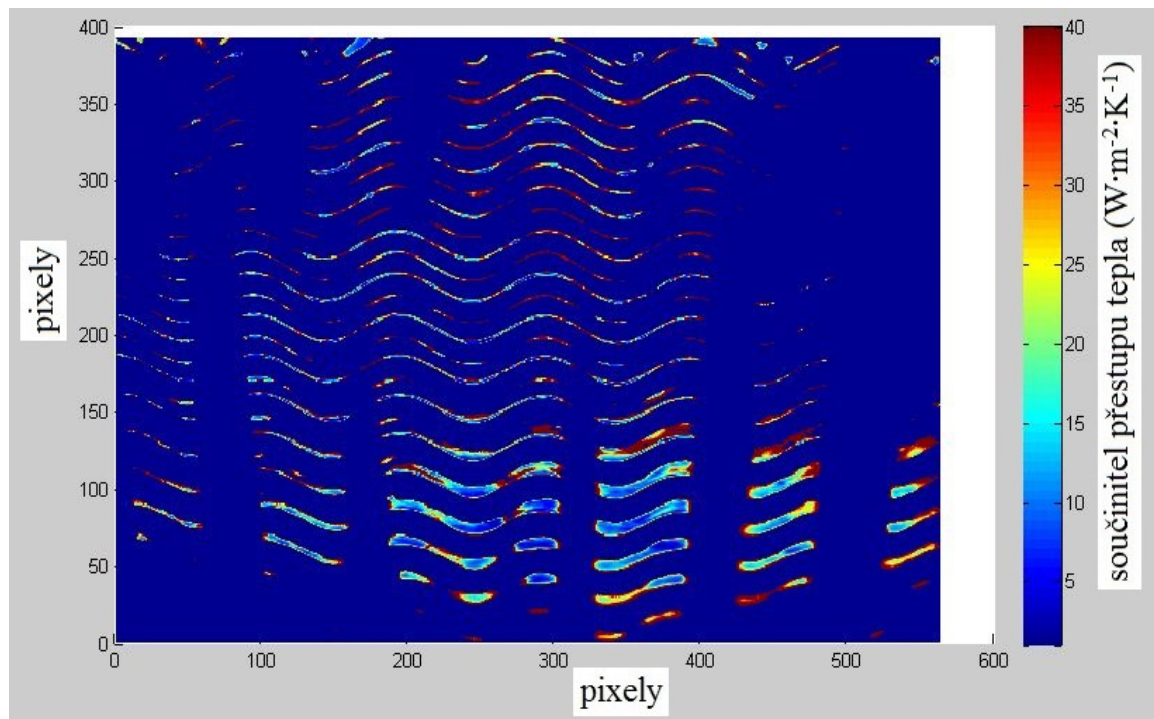
Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci 60% ohřev, 0% chlazení						
t_{str} (°C)	β (1·K ⁻¹)	ΔT (K)	ν (m ² ·s ⁻¹)	Pr (1)	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	α_0 (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
80	$3,32 \cdot 10^{-3}$	57	$16,056 \cdot 10^{-6}$	0,71	0,0263	6,42
Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci 60% ohřev, 100% chlazení						
t_{str} (°C)	β (1·K ⁻¹)	ΔT (K)	ν (m ² ·s ⁻¹)	Pr (1)	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	α_k (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
53	$3,49 \cdot 10^{-3}$	30	$14,67 \cdot 10^{-6}$	0,71	0,0252	5,37



5.2.8 50% ohřev, 100% chlazení



Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci 50% ohřev, 0% chlazení						
t_{str} (°C)	β (1·K ⁻¹)	ΔT (K)	ν (m ² ·s ⁻¹)	Pr (1)	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	α_0 (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
65	$3,43 \cdot 10^{-3}$	42	$15,116 \cdot 10^{-6}$	0,71	0,0256	5,94
Součinitel přestupu tepla pro volnou konvekci 50% ohřev, 100% chlazení						
t_{str} (°C)	β (1·K ⁻¹)	ΔT (K)	ν (m ² ·s ⁻¹)	Pr (1)	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	α_k (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
45	$3,55 \cdot 10^{-3}$	22	$14,225 \cdot 10^{-6}$	0,71	0,0249	4,88



6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo sestavit experimentální zařízení umožňující identifikaci rozložení součinitele přestupu tepla na desce rekuperačního výměníku. Určení rozložení součinitele přestupu tepla bylo založeno na termografickém měření teplot desky při různých režimech provozu experimentálního zařízení. Pro vyhodnocení naměřených dat byly sestaveny dva algoritmy. První pro kvantitativní popis rozložení součinitele přestupu tepla a druhý pro detailnější analýzu naměřených dat. Výsledky z druhého algoritmu jsou pak mapy rozložení součinitele přestupu tepla pro jednotlivé režimy zařízení.

Naměřená data poskytují mnoho informací o rozložení teploty a intenzitě přenosu tepla na desce výměníku. Z výsledných map rozložení součinitele přestupu tepla je patné, že jeho velikost je závislá především na teplotním rozdílu desky a proudícího vzduchu, na počáteční teplotě ohřáté desky a na intenzitě chlazení této desky. V textu diplomové práce jsou podrobněji vyhodnoceny režimy (100, 90, 80, 70, 60, 50)% ohřev a 100% chlazení. Výsledky ukazují, že součinitel přestupu tepla je intenzivnější pro vyšší počáteční teploty desky. Čím více tepla je odváděno proudícím vzduchem, tím vyšší je hodnota součinitele přestupu tepla. S klesající teplotou desky, klesá také hodnota součinitele přestupu tepla pro volnou konvekci na vnější straně desky. Tento pokles je vyrovnáván nárůstem součinitele přestupu tepla při nucené konvekci na vnitřní straně desky. To však platí pouze pro vyšší teploty desky. Pro režimy s nižší počáteční teplotou desky již toto pravidlo neplatí. Je to dáno především malým teplotním rozdílem mezi deskou a vzduchem.

Při vyhodnocení experimentu bylo potřeba uvažovat jistá zjednodušení. Mezi nejvýznamnější patří výpočet volné konvekce pomocí střední teploty desky. Toto zjednodušení má největší význam pro režimy, kdy je počáteční teplota desky vysoká a po zapnutí chlazení je rozložení teploty na desce značně proměnlivé. V případech, kdy je deska pouze zahřívána, popř. pokud je počáteční teplota zahřáté desky nízká, nemá toto zjednodušení velký dopad na přesnost výsledků. Dalším zjednodušením bylo zanedbání přenosu tepla vedením v místě dotyku desek a přenosu tepla zářením zahřáté desky do okolí. Pro vysoké počáteční teploty desky platí, že dominantním členem v tepelné bilanci je přenos tepla nucenou konvekcí (chlazení vzduchem). V tomto případě není zanedbání vedení a radiace tepla tak velkou chybou. Při nižších teplotách desky se sice snižuje význam přenosu tepla radiací, ale roste význam přenosu tepla vedením. Pro režimy s nižší teplotou desky má toto zjednodušení větší význam na chybu měření.

Především tato, ale i další drobná zjednodušení, mají zásadní dopad na to, že výsledky uvedené v diplomové práci slouží pro identifikaci rozložení součinitele přestupu tepla. Nikoliv pro určení přesných hodnot tohoto součinitele.

Experiment sestavený v této diplomové práci umožňuje doplnit měřicí techniku o další potřebné vybavení k tomu, aby bylo možné měřit například radiační tepelný tok. Pro získání přesnějších výsledků bude potřeba sestavit algoritmus pro vyhodnocení přestupu tepla při volné konvekci pomocí lokálních teplot. Dále bude potřeba zjistit vliv přenosu tepla vedením a přenosu tepla radiací při jednotlivých režimech experimentálního zařízení. Po provedení těchto zlepšení lze očekávat výrazné zpřesnění výsledků součinitele přestupu tepla z hlediska rozložení, ale i z hlediska konkrétních hodnot.

7 Použité zdroje

7.1 Seznam literatury

- [1] MILAN KALOUSEK a BRANISLAV HUČKO, *Přenos tepla*, Bratislava STU, 1996.
- [2] Poznámky z přednášek předmětu Vybráne statě z termodynamiky a mechaniky tekutin, *Přednášky*, TUL, 2013.
- [3] M. A. MICHEJEV, *Základy sdílení tepla*, Knižnice energetického průmyslu, Praha Průmyslové vydavatelství, 1952.
- [4] KAREL SÝKORA, *Základy sdílení tepla*, Praha SNTL, 1962.
- [5] JIŘÍ NOŽIČKA, *Sdílení tepla*, Praha ČVUT, 1998.
- [6] FRANTIŠEK JIROUŠ, *Aplikovaný přenos tepla a hmoty*, Praha ČVUT, 2010.
- [7] ARI VEPSÄLÄINEN, *Fundamentals of heat transfer*, Lappeenranta LUT Energy, 2011.
- [8] J. WELTY, Ch. WICKS, R. WILSON, G. RORRER, *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer 5th Edition*, Oregon State University, 2007.
- [9] ZDENĚK TRÁVNÍČEK, *Prezentace Impaktní proudy a přestup tepla*, TUL, 2014.
- [10] ABDULNOUR, R.S., K. WILLENBORG, J.J. MCGRATH, J.F. FOSS a B.S. ABDULNOUR, *Measurements of the convection heat transfer coefficient for a planar wall jet*, Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, roč. 2000, č. 22, s. 9.
- [14] J. PADET, A. ARFAOUI, M. REBAY, *Improvement of the Pulsed Photothermal Technique for the Measurement of the Convective Heat Transfer Coefficient*, Journal of Thermal Science, 2010, roč. 4, č. 19, s. 7.

[36] MARKÉTA PETŘÍKOVÁ, PAVEL KRYŠTŮFEK, *Tabulky a diagramy pro termodynamiku*, Liberec TUL, 2010

7.2 Internetové zdroje

[11] JAN SOVA, *Základy práce s IČT kamerou*, Centrum termografie [PDF], Centrum termografie, 2013, [cit. 2014-04-26], Dostupné z: kps.fsv.cvut.cz/file_download.php?fid=3354

[12] PETR MENCL, *Termografie*, Timber institute [online], 2014, [cit. 2014-04-26], Dostupné z: <http://www.vvud.cz/laboratore/termografie>.

[13] RADEK STEUER, JAN HOLLAN, STANISLAV ŠŤASTNÍK, *Možnosti určení emisivity materiálu pomocí infračervené termografie*, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, 2010 [cit. 2014-04-26], Dostupné z: <http://amper.ped.muni.cz/LW-infrared/omitky06.pdf>

[15] MILAN PAVELEK, *Planckův vyzařovací zákon*, Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství [online], [cit. 2014-08-14]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0202.htm>

[16] MILAN PAVELEK. *Wienův posunovací zákon*. Vysoké učení technické v Brně: Fakulta strojního inženýrství [online]. [cit. 2014-08-14]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0203.htm>

[17] MILAN PAVELEK. *Stefanův-Boltzmanův zákon*. Vysoké učení technické v Brně: Fakulta strojního inženýrství [online]. [cit. 2014-08-14]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0204.htm>

[18] JAN SOVA, *Tepelné záření*, Školení centra termografie [online], [cit. 2014-08-10], Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/tepelne-zareni/>

[19] <http://www.mykos.cz/files/cc11cf6d92.gif>, [10.8.2014]

[20] JAN SOVA, *Konstrukce termokamery*, Školení CTG [online], [cit. 2014-08-10], Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>

[21] JAN SOVA. *Chyby a omyly při měření*, Školení CTG [online], [cit. 2014-08-10], Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/chyby-a-omyly-pri-mereni-termokamerou/>

[22] MILAN PAVELEK, *Teorie termovizních měření*, [online]. Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství [cit. 2014-08-10], Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/0700-z01.pdf>

- [23] MARTIN ŽÁČEK, *Aldebarn bulletin*, Aldebran [online]. 2008 [cit. 2014-09-15]. Dostupné z:http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_50_lab.php
- [24] JAN PECH a PAVEL ZAHRADNÍK, *Mikrobolometrické obrazové snímače*, Teorie obvodů [online], Fakulta elektrotechnická ČVUT, 2008 [cit. 2014-09-15], Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03015/index.html#kap21>
- [25] <http://www.dewetron.com/int/products/dedicated-instruments/general-tm/dewe-dsa/dewe-5000-dsa-16/>, [11.2.2015]
- [26] <http://www.testo.cz/pristroje-detailne/0560+4251/testo-425>, [11.2.2015]
- [27] <http://www.testo.cz/pristroje-detailne/0560+4160/testo-416>, [11.2.2015]
- [28] <http://www.e-pristroje.cz/teplotni-cidla.html>, [11.2.2015]
- [29] <http://www.elstein.com/en/elstein-products/panel-heaters/hts-series/description/> [11.2.2015]
- [30] <http://www.diametral.cz/ac-dc-zdroje/autotransformatory/jednofazove/autotransformator-ra1f250100-0230v/10a.html>, [11.2.2015]
- [31] <http://www.infratec.de/de/thermografie/waermebildkamas/variocamr-hr-head-600-serie.html>, [26.2.2015]
- [32] Návod k použití VarioCam, HR head Cam
- [33] <http://webmium.blob.core.windows.net/users/66933/assets/e943a1c37b71a38d1ac23c4d89e27de3/katalogcz.pdf>, [4.3.2015]
- [34] <http://www.directindustry.com/prod/hameg-instruments/wattmeter-digital-14036-465666.html>, [20.4.2015]
- [35] <http://www.distrelec.cz/cs/Wattmetr-Hameg-HM8115-2/p/17610006>, [20.4.2015]