

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní
Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

Měření výkonové charakteristiky chladiče počítačového procesoru

Thermal Performance of CPU Cooler

Bakalářská práce

Studijní obor: Bez oboru

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Novotný, Ph.D.

Vypracoval: Ondřej Šedivý

Praha 2015



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro: **p. Ondřeje ŠEDIVÉHO**

program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

obor: **bez oboru**

název česky: **Měření výkonové charakteristiky chladiče počítačového procesoru**


název anglicky: **Thermal Performance of CPU Cooler**




Zásady pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši na téma sdílení tepla vedením a prouděním.
- 2) Zaměřte se na způsoby chlazení počítačových procesorů.
- 3) Navrhněte a realizujte jednoduché měřicí stanoviště pro měření výkonové charakteristiky počítačového chladiče.
- 4) Změřte výkonovou charakteristiku vhodně zvoleného chladiče v závislosti na otáčkách ventilátoru a výsledky srovnajte s údaji od výrobce.

Rozsah průvodní zprávy: 20 stran
Rozsah grafických prací: grafy, schémata, 10 stran
Seznam doporučené literatury: dle doporučení vedoucího bakalářské práce.
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Novotný, Ph.D.
Konzultant bakalářské práce: Ing. Jan Kouba
Datum zadání bakalářské práce: 30. 4. 2015
Datum odevzdání bakalářské práce: 19. 6. 2015


Prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.
Vedoucí Ú 12112




Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
Děkan fakulty

V Praze dne 30. 4. 2015

Anotační list

Jméno autora:	Ondřej Šedivý
Název česky:	Měření výkonové charakteristiky chladiče počítačového procesoru
Název anglicky:	Thermal Performance of CPU Cooler
Rok:	2015
Obor studia:	Bez oboru
Program studia:	Teoretický základ strojího inženýrství
Ústav:	Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí:	Ing. Jan Novotný, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jan Kouba
Bibliografické údaje:	Počet stran: 45
	Počet obrázků: 19
	Počet tabulek: 6
	Počet grafů: 5

Klíčová slova: Chladič počítačového procesoru, měření tepelného odporu, výkonová charakteristika

Keywords: CPU cooler, thermal resistance measuring, performance characteristic

Anotace:

Pro experimentální zjištění výkonové charakteristiky CPU chladiče bylo nejprve zapotřebí vyrobit a sestavit měřící aparaturu. Následné vyhodnocení změřených hodnot bylo provedeno podle vztahu, který uvažuje teplotu okolí a měděného tělesa nahrazující procesor. Sestavení aparatury a měření proběhlo na základě teoretických znalostí probraných v úvodních kapitolách. Po vyhodnocení naměřených výsledků tepelných odporů byly tyto hodnoty porovnány s hodnotami výrobce. Výsledek vedl k odchylce vzniklé pravděpodobně odlišným postupem měření nebo vyhodnocení.

Abstract:

In order to find thermal performance of a CPU cooler it was required to make and assemble measuring equipment. The following analysis of the recorded values was done based on a relation between the temperature of the air and the copper object, which was used instead of a CPU. The assembly of the measuring equipment and the measuring itself was based in the theoretical knowledge discussed in the introductory chapters. After the measurements of the thermal resistances were analyzed, they were compared with the values granted by the manufacturer. The results deviated and were probably cause by the diference in measurement and analysis.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a pouze s použitím literatury uvedené v seznamu.

v Praze dne

.....

Ondřej Šedivý

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Janu Novotnému, Ph.D. za inspirativní rady týkající se jak této práce, tak širší problematiky termodynamiky a provádění experimentu. Dále bych rád poděkoval své rodině, která mi poskytla během studia pevné zázemí. Dík patří také mým přátelům.

Ondřej Šedivý

Obsah

Seznam použitých značek.....	3
Úvod	4
1 Sdílení tepla vedením.....	5
1.1 Fourierův zákon	5
2 Sdílení tepla prouděním	8
2.1 Newtonův ochlazovací zákon.....	8
2.2 Kriteriaální rovnice.....	9
3 Tepelný odpor prostupu tepla	12
4 Způsoby chlazení počítačových procesorů	15
4.1 Pasivní chladič	15
4.1.1 Tepelný odpor pasivního chladiče	16
4.1.2 Zpracování pasivního chladiče	17
4.2 Aktivní chladič	17
4.3 Kombinovaný chladič	19
4.3.1 Tepelný odpor kombinovaného chladiče	20
4.4 Technologie heat pipe.....	20
4.4.1 Cyklus chladicího média v heat pipe.....	20
4.5 Vodní chladič.....	22
4.5.1 Výhody a nevýhody vodního chladiče	22
4.5.2 Okruh vodního chladiče	23
4.5.3 Účinnost vodního chladiče.....	23
4.6 Srovnání typů procesorových chladičů	24
5 Sestavení aparatury pro měření výkonové charakteristiky procesorového chladiče	25
5.1 Výběr chladiče procesoru	25
5.2 Provedení měděného tělesa a topné patrony.....	27
5.3 Konstrukce podstavce a teflonového lůžka.....	28

5.4 Měřicí přístroje	30
6 Experimentální zjištění výkonové charakteristiky procesorového chladiče a vyhodnocení	32
6.1 Změření otáčkové charakteristiky ventilátoru	32
6.2 Metody vyhodnocení	34
6.3 Změření výkonové charakteristiky procesorového chladiče, vyhodnocení a diskuse	37
7 Závěr	43
8 Zdroje.....	44

Seznam použitých značek

A, S	[m ²]	plocha	ξ_x, ξ_y, ξ_z	[-]	bezrozměrné souřadnice
a	[m ² s ⁻¹]	teplotní vodivost	λ	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	tepelná vodivost
b	[1]	konstanta	ν	[m ² s ⁻¹]	kinematická viskozita
c	[m s ⁻¹]	rychlost	ρ	[kg m ⁻³]	hustota
c_i	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita	τ	[s]	čas
f		funkce	Důležité indexy		
g	[m s ⁻²]	tíhové zrychlení	c		rychlostní
K	[m s ⁻²]	intenzita vnějšího silového pole	cA		celkový, metoda A
L	[m]	délkový rozměr	cB		celkový, metoda B
n	[min ⁻¹]	otáčky	CPU		počítačový procesor
p	[Pa]	tlak	cV		celkový, výrobce
Q	[J]	sdělené teplo	f1		tekutiny 1
\dot{Q}	[W]	tepelný tok (výkon)	f2		tekutiny 2
\vec{q}	[W m ⁻²]	měrný tepelný tok (výkon)	hp		heat pipe
R	[°C W ⁻¹]	tepelný odpor	char		charakteristický
T	[°C], v kap. 1 – 3 [K]	teplota	k		prostupu
U	[V]	napětí	kont		kontakt
x, y, z	[m]	souřadnice	MT		měděné těleso
α	[W m ⁻² K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla	ok		okolí
γ	[K ⁻¹]	součinitel rozpínavosti	p		při stálém tlaku
δ	[%]	odchylka	sž		střední, žeber
δ_i	[m]	tloušťka vrstvy	T		teplotní
η	[Pa s]	dynamická viskozita	tek		v tekutině
			V		při stálém objemu
			v		vzduch
			vyst		výstupní
			w		stěna
			z+ž		základna a žebra

Úvod

Ke zpracování tématu „Měření výkonové charakteristiky chladiče počítačového procesorového“ jako bakalářské práce mě vedla skutečnost, že problematika chlazení procesorů ani jiných elektrotechnických součástí z termodynamického pohledu není v podrobnější formě snadno dostupná a většina prací je převážně v jiném jazyce než českém. Mým záměrem tedy bylo k této oblasti menším dílem přispět. Obecně by tato práce měla sloužit jako základ pro další rozvoj technicky vzdělaného čtenáře zajímavějšího se o oblast chlazení jak procesorů, tak elektroniky obecně.

Dalším podstatným impulzem pro tvorbu této práce byl stále se zvyšující výkon elektroniky a v souvislosti s tím vysoké požadavky na odvod ztrátového výkonu. Z toho plyne vysoký potenciál celého odvětví chlazení elektroniky a v budoucnu se předpokládá pokračující trend vývoje a nacházení nových možností.

Uspořádání kapitol směřuje od zmínění základních fyzikálních dějů, které nastávají při ochlazování těles, a to především sdílení tepla vedením a prouděním (kapitoly 1 a 2). Pokračuje přes základní i moderní možnosti chlazení počítačových procesorů (kapitola 4) po poslední část této práce, kterou je navržení a sestavení experimentu pro měření výkonové charakteristiky zvoleného chladiče procesoru a tuto charakteristiku změřit (kapitoly 5 a 6). Představení možností chlazení procesorů si klade za cíl seznámit především se základní konstrukcí jednotlivých chladičů, výhod a nevýhod jednotlivých chladičů, případů, kdy je vhodné daný chladič použít a nastínit fyzikální principy funkce.

Cílem návrhu experimentu je vyrobit a uspořádat měřicí trať tak, aby bylo možné změření věrohodných výsledků pro následné vyhodnocení tepelného odporu chladiče procesoru. Dalším úkolem je tyto výsledky zpracovat podle zvolené metody a vysvětlit použití dané metody. Na závěr tyto zjištěné hodnoty porovnat s údaji, které uvádí výrobce, a provést případnou diskusi shody nebo neshody těchto hodnot.

1 Sdílení tepla vedením

K sdílení tepla vedením neboli kondukcí dochází v důsledku kmitání částic kolem své rovnovážné polohy a tím předávání mechanických forem energie sousedním částicím. Významný vliv má v pevných látkách. Dochází k němu i v tekutinách, kde je ovšem zastřeno makroskopickým pohybem částic (prouděním). Jeho vliv lze prokazatelně měřit až v případě, že je tento makroskopický pohyb potlačen (např. v úzkých štěrbinách, v drobných dutinách). Nezávisí tedy na pohybu tělesa ani přeskupování částic [12].

Pro výpočty se nespojitě prostředí mikrostruktury materiálu zanedbává a nahrazuje kontinuem a velikost sledovaných částí je vždy mnohonásobně větší než vzdálenost mezi atomy a molekulami [14]. V kontinuu se vytvoří skalární teplotní pole, jež mapujeme soustavou izotermických ploch, které jsou ve stacionárním poli nepohyblivé, v nestacionárním se pohybují [12].

Proces vedení tepla je možno sledovat pomocí základní stavové veličiny – teploty. Teplota ve sledovaném materiálu je funkcí místa a času a její obecné matematické vyjádření má tvar

$$T = f(x, y, z, \tau). \quad [K] \quad (1 - 1)$$

1.1 Fourierův zákon

Základní vztah vedení tepla je dán Fourierovým zákonem. Vyjadřuje, že elementární množství tepla dQ procházející elementární izotermickou plochou dS v elementárním časovém úseku $d\tau$, je úměrné teplotnímu gradientu [8]

$$dQ = -\lambda \operatorname{grad} T dS d\tau. \quad [J] \quad (1.1 - 1)$$

Vydělíme-li tuto rovnici časem $d\tau$, dostaneme elementární výkon přenesený plochou dS za čas $d\tau$

$$d\dot{Q} = -\lambda \operatorname{grad} T dS. \quad [W] \quad (1.1 - 2)$$

Tvar (1.1 – 2) byl v praxi potvrzen, takže má platnost zákona. Fourierův zákon je často psán ve tvaru plošné hustoty tepelného toku, který říká, jaký výkon je přenášen plochou dS [8]:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T . \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (1.1 - 3)$$

Součinitel úměrnosti λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$] se nazývá *tepelná vodivost*. Představuje rychlost, jakou se teplo šíří z teplejších částí látky do chladnějších. Závisí především na teplotě, u plynů i na tlaku. Dříve byl pokládán za konstantu, pozdější experimenty však ukázaly, že tomu tak není. Ve výpočtech se složitější závislost na teplotě nahrazuje v menším intervalu závislostí lineární, v některých jednodušších teoriích a výpočtech se považuje za konstantní [12]. U většiny látek má největší význam závislost na teplotě, kterou při lineárním zjednodušení můžeme získat ze vztahu

$$\lambda = \lambda_0 [1 + b(T - T_0)], \quad [\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}] \quad (1.1 - 4)$$

kde λ_0 je známý součinitel tepelné vodivosti při teplotě T_0 , a b je konstanta určená experimentálně [8]. Pro kovové materiály se pohybuje λ v rozmezí 2 – 418 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$, pro tepelné izolanty je obecně menší než 0,25 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ [8]. Příklady součinitele tepelné vodivosti vybraných kovů při teplotě 25 °C jsou shrnuty v (tab. 1.1 – 1).

Druh kovu	Součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]
Stříbro	429
Měď	401
Zlato	310
Hliník	205
Zinek	116
Železo	80
Litina	55
Uhlíková ocel	54

Tab. 1.1 – 1: součinitelé tepelné vodivosti vybraných kovů pro teplotu 25 °C

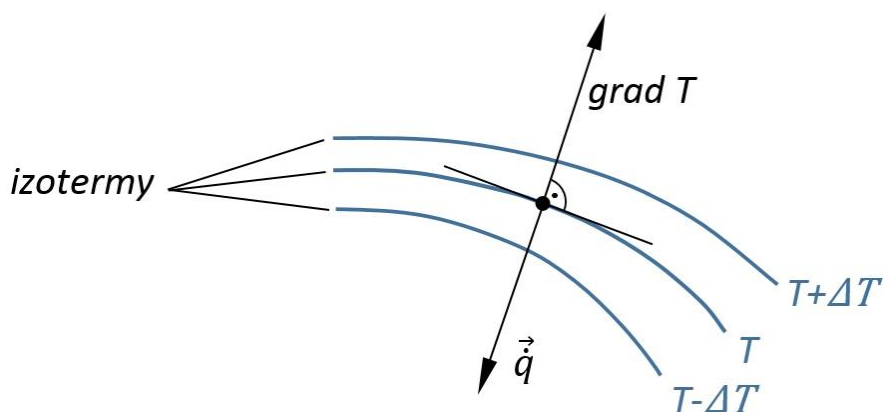
Tyto hodnoty platí pouze pro čisté materiály. Pokud bude například měď byt' jen nepatrně znečištěna stopami arsenu, klesne její tepelná vodivost na $\lambda = 142 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [8].

U čistých kovů převažuje přenos tepla prostřednictvím volných elektronů nad pružným kmitáním částic. „S rostoucí teplotou se zvyšují tepelné nehomogenity v kovu, které způsobují rozptyl volných elektronů, a proto klesá λ “ [8].

Opačný jev nastává u slitin, kde s rostoucí teplotou roste i tepelná vodivost.

U stavebních a tepelně izolačních materiálů hraje významnou roli vlhkost a pórovitost. λ vody je mnohem vyšší než λ vzduchu jinak vyplňujícího tyto póry. Dále i λ vzduchu je obvykle menší než λ vlastního materiálu, z čehož plyne, že čím je materiál pórovitější, tím má menší λ a tím i lepší izolační vlastnosti.

Ve Fourierově zákoně (1.1 – 3) dále vystupuje vektor plošné hustoty tepelného toku \vec{q} . Obecně vyjadřuje, jaký tepelný výkon je přenášen plochou 1 m^2 . Orientace vektoru \vec{q} je ve směru ubývající teploty. Teplotní gradient $\text{grad} T$ má však smysl opačný, a proto je Fourierův zákon definován se záporně vzatým gradientem teploty. K názornému vysvětlení slouží (obr. 1.1 – 1) [8].



Obr. 1.1 – 1: vyznačení gradientu teploty a směru vektoru plošné hustoty tepelného toku

Dále se v některých teoriích vedení tepla zavádí *teplotní vodivost*, definována

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad [\text{m}^2 \text{ s}^{-1}] \quad (1.1 - 5)$$

a vyjadřuje schopnost hmoty měnit teplotu v čase [16].

2 Sdílení tepla prouděním

2.1 Newtonův ochlazovací zákon

K sdílení tepla prouděním neboli konvekcí dochází v případě, kdy tekutina obtéká těleso a je tedy spojeno, na rozdíl od kondukce, s přenosem hmoty. Neexistuje jako samostatný způsob přenosu tepla a vždy je doprovázeno sdílením tepla vedením. Velikost složky konvekce bývá ovšem oproti kondukcí značně menší.

Sdílení tepla kondukcí podstatně závisí na druhu proudění, které může být buď přirozené (volné), nebo vynucené. V obecných případech se může vyskytovat přenos tepla kombinací těchto dvou druhů. Volné proudění vzniká rozdílem hustot různě ohřáté tekutiny (*termosifonový efekt*) [8]. Nucené proudění vzniká působením vnějších sil, kdy bývá vyvozeno čerpadlem, kompresorem apod.

Jednoduchým příkladem konvekce je obtékání tuhé stěny (*obr. 2.1 – 1*). Uvažujme, že teplota stěny T_w je vyšší než teplota obtékajícího vzduchu T_0 a plocha stěny je A . V blízkosti stěny vznikají při obtékání tzv. *teplotní a rychlostní mezní vrstvy* charakteristické velkým gradientem veličin. Vazká tekutina na stěně lepe a rychlost tekutiny v rychlostní mezní vrstvě roste z nuly na rychlost c_0 . Vzdálenost desky od místa s rychlostí $c = 0,99 c_0$ se potom nazývá rychlostní mezní vrstva δ_c . Obdobně se určí teplotní mezní vrstva δ_T jako vzdálenost stěny o teplotě T_w a místa vzdáleného kolmo od stěny s teplotou T_0 .

Elementární tepelný tok $d\dot{Q}$ [W], který v tomto případě přestoupí konvekcí ze stěny do tekutiny, je dán *Newtonovým ochlazovacím zákonem*

$$d\dot{Q} = \alpha (T_w - T_0) dA. \quad [\text{W}] \quad (2.2 - 1)$$

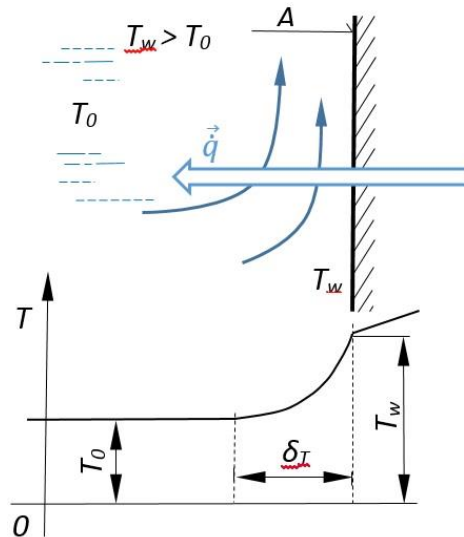
α [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$] je tzv. *součinitel přestupu tepla*. Je závislý na všech proměnných, které ovlivňují proudění v okolí stěny. Uvedme některé základní:

1. Délkový rozměr L_{char} [m] systému. Závisí především na směru proudění kolem tělesa. U vnitřních úloh se uvažuje L_{char} jako hydraulický průměr, u vnějších úloh je to při podélném

obtékání délka tělesa, u vnějších úloh příčný rozměr a při příčném obtékání válce jeho průměr.

Pro komplikovanější geometrie je určení L_{char} složitější [14].

2. Hustota ρ [kg m^{-3}] tekutiny.
3. Charakteristická rychlost c_{char} [m s^{-1}] proudového pole tekutiny.
4. Dynamická viskozita η [Pa s] nebo kinematická viskozita ν [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$].
5. Tepelná vodivost λ_{tek} [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$] tekutiny.
6. Teplotní vodivost a [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$].
7. Měrné tepelné kapacity za stálého objemu a tlaku c_v a c_p [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$].
8. Teplota tekutiny T_{tek} [K] nebo teplotní rozdíl $\Delta T = T_w - T_0$.
9. Intenzita vnějšího silového pole K [m s^{-2}].



Obr. 2.1 – 1: konvekce podél stěny s vyznačením teplotní mezní vrstvy

2.2 Kriteriační rovnice

Při řešení termodynamických úloh proudění vyvstává otázka, jak zjistit součinitel přestupu tepla α . Odpovědí je *kriteriační rovnice*. Pro daný případ je vždy podstatné určení souboru rozměrových proměnných, na nichž je součinitel přestupu tepla závislý:

$$\alpha = f(L_{char}, \rho_{tek}, \eta, c_{char}, \lambda_{tek}, c_p, \nu, T, \Delta T \dots). \quad (2.2 - 2)$$

Je zřejmé, že takovýto fyzikální popis problematiky je velice složitý a experimentálně nevládnutelný. Navíc je nutné při určování součinitele α dbát obezřetnosti, protože obor jeho proměnnosti se rozprostírá přes šest řádů. Proto je obvyklé závislost (2.2 – 2) nejprve zpracovat pomocí teorie *fyzikální podobnosti* (o teorii fyzikální podobnosti podrobněji v [11]).

Teorie fyzikální podobnosti pracuje s bezrozměrnými podobnostními čísly, která byla zavedena z důvodu snížení proměnných (2.2 – 2) na základě vazeb mezi jejich rozměry. V teorii stacionární tepelné konvekce se pracuje nejčastěji s těmito podobnostními čísly:

1. **Nusseltovo číslo**
$$Nu = \frac{\alpha L_{char}}{\lambda_{tek}} . \quad (2.2 - 3)$$

(„Poměr mezi vedením tepla a přestupem tepla v tekutině.“ [4])

2. **Prandtlovo číslo**
$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda_{tek}} . \quad (2.2 - 4)$$

(„Podobnost teplotních a rychlostních polí v proudu.“ [4])

3. **Reynoldsovo číslo**
$$Re = \frac{c_{char} L_{char}}{\nu} . \quad (2.2 - 5)$$

(„Poměr hybnosti a třecích sil. Vyjádření hydrodynamických podmínek proudu.“ [4])

4. **Grashofovo číslo**
$$Gr = \frac{\gamma g \Delta T L_{char}^3}{\nu^2} . \quad (2.2 - 6)$$

(„Poměr sil vztlakových a viskózních, charakterizující volné proudění, vzniklé rozdílem teplot.“ [4])

Při pohledu na vyjádření podobnostních čísel Prandtlava, Reynoldsova a Grashofova je vidět, že součinitel přestupu tepla α figuruje pouze ve vztahu pro Nusseltovo číslo (2.2 – 3). Výsledný tvar kriteriální rovnice je určen experimentálně a Nusseltovo číslo je funkcí podobnostních čísel (2.2 – 4 až 2.2 – 6). Je tedy klíčové primárně určit tato čísla, přičemž je nezbytná znalost fyzikálních veličin v těchto vztazích. Matematický vztah pro určení Nusseltova čísla má tedy následující podobu [14]

$$Nu = f (Re, Pr, Gr, \xi_x, \xi_y, \xi_z) , \quad (2.2 - 8)$$

kde ξ_x, ξ_y, ξ_z jsou bezrozměrové souřadnice. V praxi se při výpočtu součinitele α použije následujícího postupu:

1. Vyhledá se konkrétní kritériální rovnice (např. v termodynamických tabulkách) pro daný případ.
2. Při znalosti fyzikálních vlastností materiálů obtékaných těles a tekutin, které je obtékají, se vypočítají bezrozměrná čísla obsažená v dané kritériální rovnici.
3. Bezrozměrná čísla vypočtená v předešlém bodě se dosadí do dané kritériální rovnice a vypočítá se Nusseltovo číslo.
4. Ze vztahu (2.2 – 3) se vyjádří hledaný součinitel přestupu tepla α .

Při praktických úlohách se rovnice (2.2 – 8) zjednodušuje podle konkrétních případů lišících se podmínkami jednoznačnosti, protože stanovení takového počtu kritérií je obtížné. Výsledný tvar se určuje na základě experimentálních výsledků.

Podívejme se nyní na několik základních případů kritériálních rovnic, kdy uvažujeme pouze stacionární úlohy bez vnitřních zdrojů. Ve vztahu (2.2 – 8) odpadnou bezrozměrné souřadnice ξ_x, ξ_y, ξ_z v případě, je-li Nusseltovo číslo po celém teplosměnném povrchu konstantní a tento vztah se zjednoduší následovně

$$Nu = f(Re, Pr, Gr). \quad (2.2 - 9)$$

Vztah (2.2 – 9) se používá v případech, kdy se současně uplatňuje vliv nucené i přirozené konvekce. Dále lze pro případ výrazně vynuceného stacionárního proudění zanedbat vliv Grashofova čísla a rovnice (2.2 – 9) přejde na tvar

$$Nu = f(Re, Pr). \quad (2.2 - 10)$$

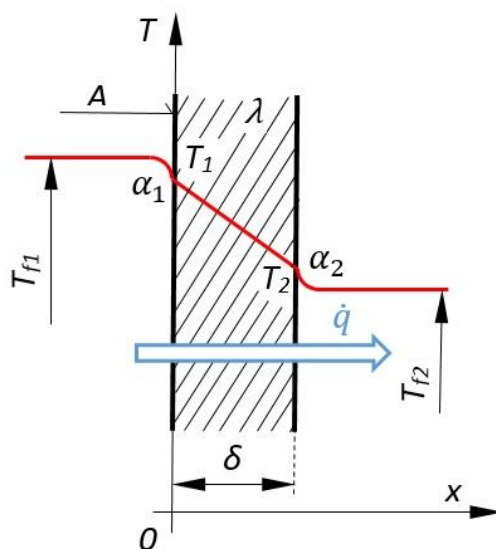
Prandtlovo číslo je závislé pouze na materiálových vlastnostech tekutiny. Vztahuje se k tloušťkám mezních vrstev, referenční rychlosti a teplotě. Pro suchý vzduch je možno předpokládat jeho hodnotu konstantní 0,72 pro teplotní rozsah 10 – 200 °C.

V případě přirozeného stacionárního proudění se Reynoldsovo kritérium stává závislým a kritériální rovnici píšeme ve tvaru

$$Nu = f(Gr, Pr). \quad (2.2 - 11)$$

3 Tepelný odpor prostupu tepla

Druhá polovina této práce se zabývá zjišťováním tepelného odporu kombinovaného procesorového chladiče, a proto je vhodné představit určitý teoretický základ vztahující se k této fyzikální veličině. Aplikace tepelného odporu je ukázána na prostupu tepla rovinnou stěnou (obr. 3.1 – 1).



Obr. 3 – 1: prostup tepla rovinnou stěnou

Pojem prostup tepla zahrnuje jak vedení tepla vlastní stěnou, tak přestup tepla z okolní tekutiny do vnějšího povrchu stěny (nebo opačně) po obou stranách stěny [8]. Na (obr. 3 – 1) je zobrazena rovinná stěna, jejíž povrchy mají teplotu T_1 a T_2 . Stěna je obklopena tekutinou (nebo různými tekutinami) mající teploty T_{f1} a T_{f2} . Součinitelé přestupu tepla α_1 , α_2 a součinitel tepelné vodivosti stěny λ jsou známé. Za použití Fourierova zákona (1.1 – 3) a Newtonova zákona (2.2 – 1) lze pro prostup tepla rovinnou stěnou odvodit následující vztah [8]

$$\dot{q} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} (T_{f1} - T_{f2}). \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (3 - 1)$$

V případě, že je řešen prostup tepla složenou stěnou skládající se z desek o různých tepelných vodivostech λ , rozšiřuje se (3 – 1) následodvně

$$\dot{q} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} (T_{f1} - T_{f2}). \quad (3 - 2)$$

Vztah (3 – 2) se pro zjednodušení píše v následujícím tvaru

$$\dot{q} = k (T_{f1} - T_{f2}), \quad (3 - 2)$$

kde

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}] \quad (3 - 3)$$

se nazývá *součinitel prostupu tepla*. Je to množství tepla, které projde jednotkovou plochou povrchu stěny za jednotku času při rozdílu teplot mezi oběma tekutinami 1 K.

Převrácenou hodnotou součinitele prostupu tepla

$$R_k = \frac{1}{k} \quad [\text{m}^2 \text{K W}^{-1}] \quad (3 - 4)$$

se získá plošný odpor prostupu tepla.

$$R_k = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} = R_{\alpha 1} + R_{\lambda} + R_{\alpha 2}, \quad (3 - 5)$$

kde $R_{\alpha 1}$ a $R_{\alpha 2}$ nazýváme plošné odpory přestupu tepla a R_{λ} plošný odpor vedení tepla.

Pokud je zjišťován tepelný odpor komplikovaného tělesa a je potřebné získat jeho celkový tepelný odpor a nikoli plošný tepelný odpor, jako tomu bude závěru této práce, lze získat tento tepelný odpor vydělením R_k plochou A:

$$R = \frac{R_k}{A} . \quad [\text{K W}^{-1}] \quad (3 - 6)$$

Z takto představené teorie je možné učinit následující závěr. Tepelný tok prošlý stěnou je dán

$$\dot{Q} = k (T_{f1} - T_{f2}) A = \frac{1}{R_k} (T_{f1} - T_{f2}) A , \quad [\text{W}] \quad (3 - 7)$$

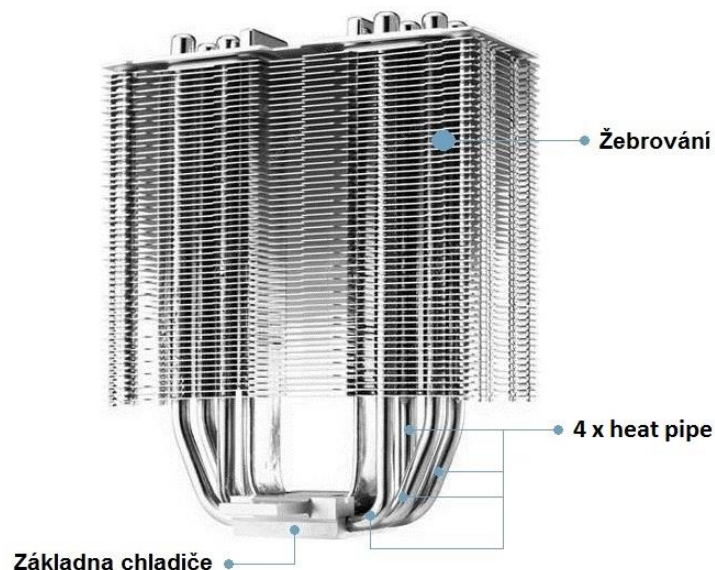
$$\dot{Q} = k (T_{f1} - T_{f2}) A = \frac{1}{R} (T_{f1} - T_{f2}) . \quad [\text{W}] \quad (3 - 8)$$

4 Způsoby chlazení počítačových procesorů

V následující části práce budou představeny hlavní způsoby chlazení počítačových procesorů od základních po nové progresivní. Je to především pasivní, aktivní, kombinované a vodní chlazení. Obecně můžeme říci, že chladiče pracují na principu konvekce i kondukce současně a primárně je dělíme na chlazení pasivní a aktivní podle způsobu realizované konvekce.

4.1 Pasivní chladič

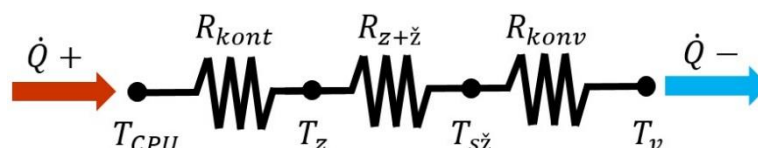
Pasivní chlazení je nejjednodušším typem chlazení a umožňuje nám odvádět teplo do okolního prostředí (vzduchu) pomocí volné konvekce. Ukázka moderního pasivního chladiče doplněného o čtyři heat pipe (více v kapitole 4.4 *Technologie heat pipe*) je zobrazena na (obr. 4.1 – 1). Tento chladič je tvořen hliníkovou základnou, která je spojená s žebry prostřednictvím čtyř heat pipe, které vedou teplo ze základny do žebrování.



Obr. 4.1 – 1: celohliníkový pasivní chladič Coolermaster TPC 600 se čtyřmi heat pipe [2]

4.1.1 Tepelný odpor pasivního chladiče

Při volbě chladiče je podstatný především výkon a účinnost, s jakou bude teplo odváděno z povrchu procesoru do vzduchu. U jednoduchých pasivních chladičů závisí účinnost na mnoha faktorech, především na použití materiálu žebér, velikosti plochy žebér, povrchové úpravě a dalších méně podstatných parametrech [13]. Tyto určují výsledný tepelný odpor, který je dán pro pasivní chladič dle (obr. 4.1 – 2).



$\dot{Q} +$: tepelný tok z procesoru do základny chladiče

T_{CPU} : teplota procesoru

R_{kont} : tepelný odpor kontaktu mezi procesorem a základnou chladiče

T_z : teplota spodní části základny chladiče

$R_{z+ž}$: tepelný odpor základny a žebér

$T_{sž}$: střední teplota žebér

R_{konv} : tepelný odpor spojený s konvekcí

T_v : teplota vzduchu

$\dot{Q} -$: tepelný tok z chladiče do okolního vzduchu

Obr. 4.1 – 2: schematické znázornění tepelných odporů v pasivním chladiči

Podívejme se nyní blíže na toto schéma, které platí pro základní pasivní chladič bez heat pipe, kdy je základna přímo spojena s žebry. Celkový tepelný odpor chladiče R_c je dán stejným způsobem, jako odpor při zapojení rezistorů v elektrickém obvodu. Lze ho tedy získat prostým součtem odporů R_i následovně

$$R_c = R_{kont} + R_{z+ž} + R_{konv} \quad [^{\circ}\text{C W}^{-1}] \quad (4.1 - 1)$$

Při návrhu pasivního chladiče plyne požadavek na co nejnižší celkový tepelný odpor R_c a podle rovnice (4.1 – 1) tedy na dílčí tepelné odpory R_i .

Rozeberme si možnosti, kterými je možné tepelné odpory R_i snížit. Kontaktní tepelný odpor procesoru a základny chladiče R_{kont} lze zmenšit snížením drsnosti stykové plochy základny a dále použitím teplovodící pasty, která je u lepších chladičů již aplikována při výrobě. Teplovodivá pasta je v zásadě izolant vzhledem k tepelné vodivosti kolem $0,8 - 10 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$, u moderních metalických past se však dosahuje až desetinásobných hodnot. Oproti vzduchu ($\lambda = 0,026 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$), který by jinak vyplňoval mezery v nerovnostech stykových ploch, je teplovodivá pasta nutným řešením. Tepelný odpor základny a žeber R_{z+z} je možné snížit u obou součástí vhodnou geometrií a použitím materiálů o lepší tepelné vodivosti. Tepelný odpor spojený s konvekcí R_{konv} ovlivníme u pasivního chladiče zvětšením plochy žeber a umožněním co nejlepšího přístupu vzduchu.

4.1.2 Zpracování pasivního chladiče

Zpracování chlazení je dáno kompromisem mezi ekonomikou výroby a účinností. Nejběžnějším případem je měděná základna a hliníková žebra, která maximálně zvětšují teplosměnnou plochu. Běžně se lze setkat i s celoměděnými nebo celohliníkovými CPU chladiči. Měď má oproti hliníku vyšší tepelnou vodivost a je možné docílit menší tloušťky žeber a následně menšího objemu chladiče při stejném výkonu, což je výhodné z důvodu kolizí s ostatními komponentami v PC boxu. Měděné provedení je ovšem ekonomicky náročnější.

V dnešní době se klasické pasivní chladiče vzhledem k rapidnímu nárůstu produkovaného tepla procesory prakticky nepoužívají. Často se můžeme ovšem setkat s případy, kdy jsou doplněny o technologii heat pipe. Takové se při správné konstrukci a dobrém odvětrávání PC boxu mohou vyrovnat chladičům aktivním. Správné odvětrání PC boxu je v tomto případě zásadní a neměl by chybět ventilátor pro vhánění vzduchu na jedné straně boxu a druhý na opačné straně pro jeho odvod.

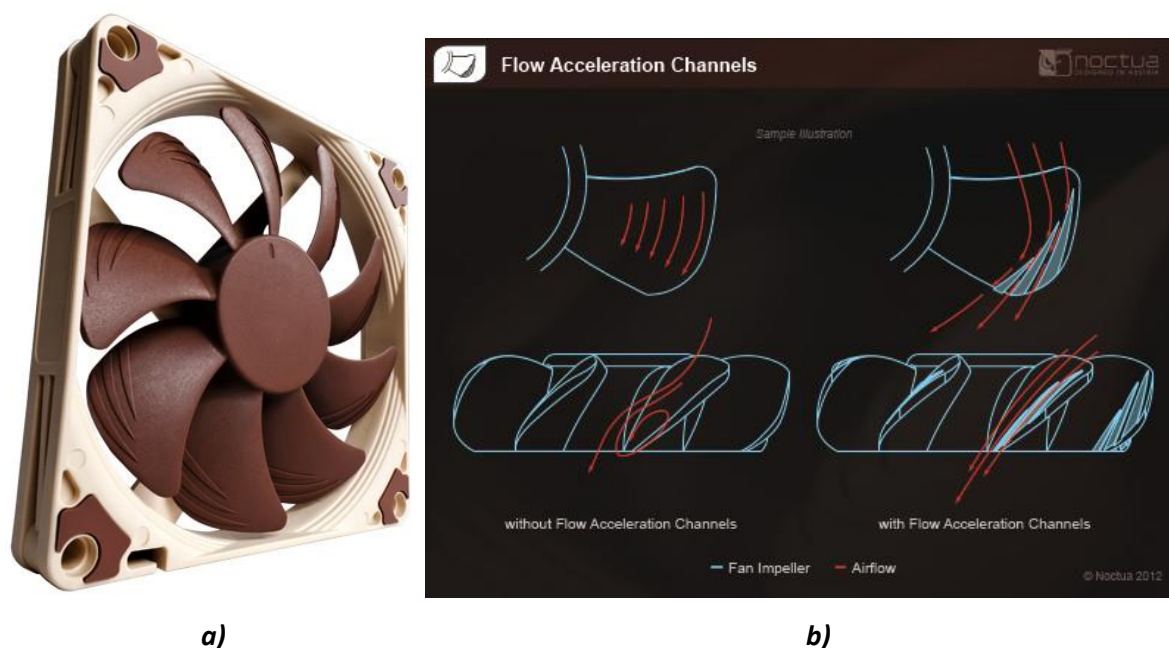
4.2 Aktivní chladič

Aktivní chlazení nám umožňuje prostřednictvím proudu vzduchu odvod tepla nucenou konvekcí (podrobněji bylo vysvětleno v kapitole 2 *Sdílení tepla prouděním*), a tím zvýšení účinnosti chlazení, jelikož zvýšíme součinitel přestupu tepla α . Aktivní chladiče se k chlazení procesorů používají vždy spolu s pasivními chladiči. Hlavní a téměř jedinou nevýhodou je vznik hluku.

Jednotlivé ventilátory se liší rozsahem otáček, průměrem, tvarem a počtem lopatek. Tyto parametry mají vliv na nejpodstatnější vlastnosti ventilátoru a těmi jsou objemový průtok vzduchu

udávaný nejčastěji v jednotkách CFM¹ a hlučnost, udávána v dB. Průtok vzduchu závisí ve větším měřítku na provedení lopatek než na otáčkách.

Tvarem lopatek se dnes zabývá řada výrobců. Příkladem může být německá firma Noctua, která se vyznačuje použitím akceleračních drážek (obr. 4.2 – 1 b). Výrobce uvádí, že tyto drážky usměrňují proud vzduchu a zabraňují vzniku vírů na ploše lopatky a důsledkem je urychlení proudění a snížení hlučnosti [6].



Obr. 4.2 – 1:

a) aktivní chladič Noctua NF-A9x14 PWM [10]

b) srovnání proudění podél lopatky s akceleračními kanálky a bez nich [6]

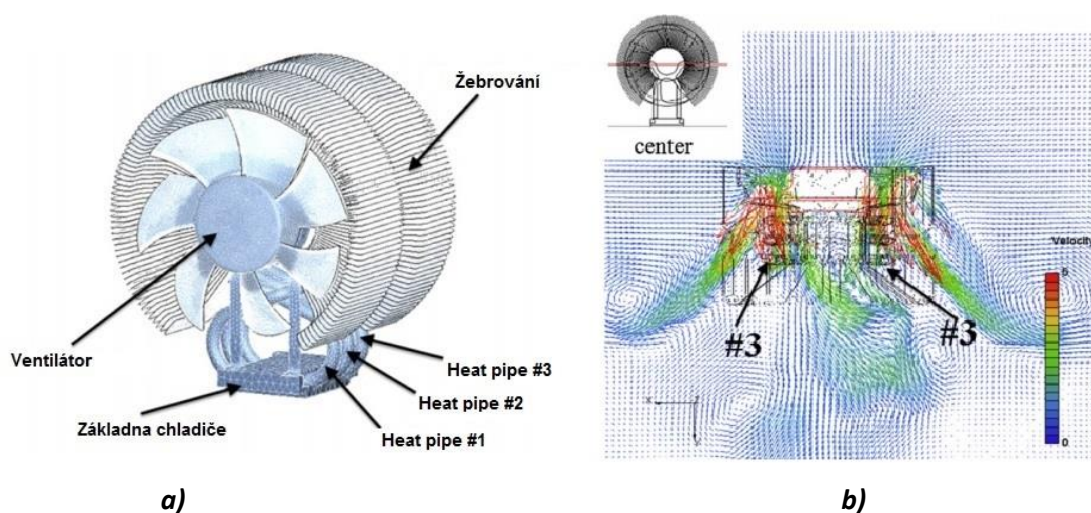
Ventilátory bývá nutné osadit i PC box. Tyto ventilátory mají oproti procesorovým nejčastěji větší průměr a nižší otáčky, řádové mezi 1000 –1500 min⁻¹, mohou mít ovšem i mnohem více. Tyto tvoří tzv. tunel, což je proud vzduchu uvnitř PC boxu mezi ventilátorem, který vzduch vhání a tím, který ho odvádí. Ventilátorů je často použito i více.

¹ Jednotka CFM představuje průtok jedné krychlové stopy za minutu (cubic feet per minute); 1 CFM = 1,699 m³ h⁻¹.

4.3 Kombinovaný chladič

Kombinovaným způsobem se dnes chladí počítačové komponenty produkující velké množství tepla (mimo procesory jsou to především jádra grafických karet, začíná se objevovat i kombinované chlazení pro chipsety). Moderní kombinovaný chladič pro procesor ve složení: základna, heat pipy, žebrování a ventilátor je zobrazen na (obr. 4.3 – 1 a).

Chladiče procesorů, pracující na principu kombinace pasivního chladiče a ventilátoru, dosahují chladicích výkonů přes 150 W. Oproti chladiči bez ventilátoru je tento typ rozměrově menší při zachování stejného chladicího výkonu. Poznamenejme, že hustotě žebrování musí odpovídat průtok vzduchu a tedy výkon ventilátoru. Při kombinaci velkého množství tepla, hustého žebrování a malého průtoku vzduchu ztrácí chladič účinnost, jelikož se nezajistí dostatečná nucená konvekce [13].



Obr. 4.3 – 1:

a) kombinovaný chladič Zalman CNPS – 7900 [3]

b) znázornění pole vektorů rychlostí proudícího vzduchu při otáčkách ventilátoru 2000 min^{-1} [18]

Pro představu o proudění vyvozené ventilátorem je na (obr. 4.3 – 1 b) znázorněno pole vektorů rychlostí proudícího vzduchu (v pravé části se nachází stupnice s rozsahem $0 - 5 \text{ m s}^{-1}$). Šipky s popisem #3 směřují na heat pipe číslo 3. Z tohoto diagramu je zřejmé, že okolo této heat pipe je rychlost proudění nižší než okolo heat pipe #1 a #2, a proto zde bude docházet ke zhoršenému odvodu tepla. Důvodem je, že 3. heat pipe je kryta předchozími. Rychlost proudění má dominantní vliv na odvod tepla z příslušné části chladiče a je možné ji značně ovlivnit nepatrnou změnou geometrie chladiče a uspořádáním jednotlivých součástí.

4.3.1 Tepelný odpor kombinovaného chladiče

Stejně jako u pasivního chladiče bychom mohli naznačit místa, kde dochází k tepelným odporům R_i . Oproti výše vysvětlenému schématu tepelného odporu u pasivního chlazení (obr. 4.1 – 2) přibude pro moderní aktivní chladič tepelný odpor heat pipe R_{hp} . Nucená konvekce vede ke zvýšení součinitele přestupu tepla α , a tím efektivnějšímu odvodu tepla. Heat pipe nám umožní rovnoměrnější a rychlejší odvod tepla z povrchu procesoru směrem do žebër ve srovnání s případem, kdy se teplo šíří žebry již od procesoru, a tím značně sníží celkový odpor chladiče.

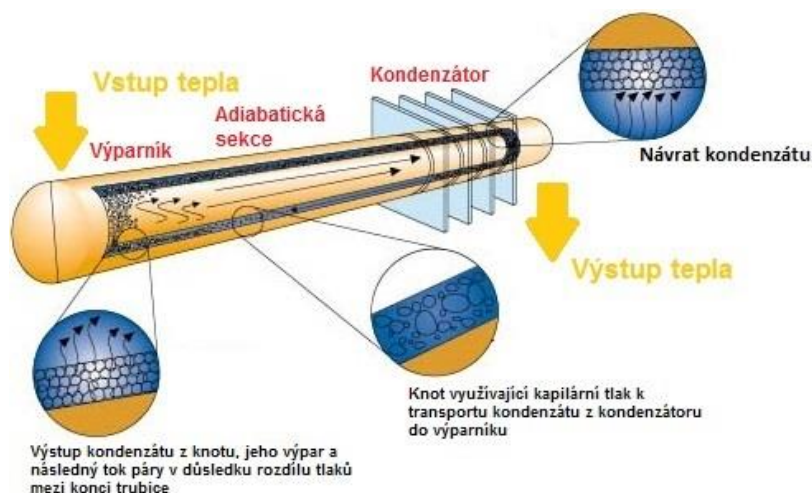
4.4 Technologie heat pipe

Tato technologie byla poprvé patentována v roce 1942 Američanem R. S. Gauglerem, pracovníkem firmy General Motors, a sloužila k chlazení ledových boxů. Od té doby prošla značným pokrokem a našla uplatnění v řadě odvětví od kosmonautiky po energetiku.

Heat pipe, neboli tepelná trubice, se skládá ze dvou hlavních částí. Jsou jimi výparník a kondenzátor, mezi kterými probíhá cirkulace pracovního média. V hermeticky uzavřené trubici je nastaven podtlak k usnadnění výparu a kondenzace média.

4.4.1 Cyklus chladicího média v heat pipe

Popišme si nyní cyklus chladicího média prostřednictvím (obr. 4.4 – 1).



Obr. 4.4 – 1: okruh chladicího média v heat pipe [7]

Na jednom konci trubice (výparník) dodáváme teplo, a tím dochází k výparu chladicího média. Jelikož je v trubici podtlak, dojde k varu již při nepatrném ohřátí. Přenos par od výparníku do kondenzátoru probíhá v adiabatické části trubice, až následně transportovaná pára v kondenzátoru zkondenzuje. Dále se kondenzát vrací zpět do výparníku po stěnách trubice. Pokud je stěna trubice hladká, musí být ohříváný konec níže než ochlazovaný, aby mohl kondenzát volně stékat zpět. Při určité úpravě stěny, jako např. podélnými drážkami, poleptáním nebo výstelkou z drátěné sítě může být výparník výše než kondenzátor. Drátěné síťce se říká knot a prostřednictvím kapilárního tlaku se kondenzát vrací knotem zpět do výparníku, kde se celý cyklus opět opakuje.

Pracovními látkami jsou dnes nejčastěji destilovaná voda, alkohol a propan butan [15]. Velice významnou vlastností je schopnost přenosu velkých výkonů při malém rozdílu teplot (okolo 2° C) a vysoká tepelná vodivost.

Důležitým faktorem ovlivňujícím průběh chlazení je rozdíl tlaků par vznikajících ve výparníku a kapaliny vstupující do výparníku z knotu. Tlakový rozdíl musí být větší nebo roven všem tlakovým ztrátám podél trati, kterou chladicí médium absolvuje. Tento vztah lze popsat následovně [15]:

$$\Delta p_{c,max} \geq \Delta p_1 + \Delta p_v + \Delta p_g , \quad [\text{Pa}] \quad (4.4 - 1)$$

kde je následovný význam veličin:

1. $\Delta p_{c,max}$: tlakový rozdíl par vystupujících z výparníku a kondenzátu do něj vstupujícího.
2. Δp_1 : tlakový spád potřebný k přesunu tekutiny z kondenzátoru do výparníku.
3. Δp_v : tlakový spád nutný k toku par z výparníku do kondenzátoru.
4. Δp_g : rozdíl tlaků způsobený vlivem gravitace. Může být nulový, kladný nebo záporný v závislosti na sklonu trubice.

Pokud podmínka (4.4 – 1) není splněna, dojde pouze k výparu chladicího média, jeho cyklus se neuzavře a heat pipe není schopna kontinuálního provozu.

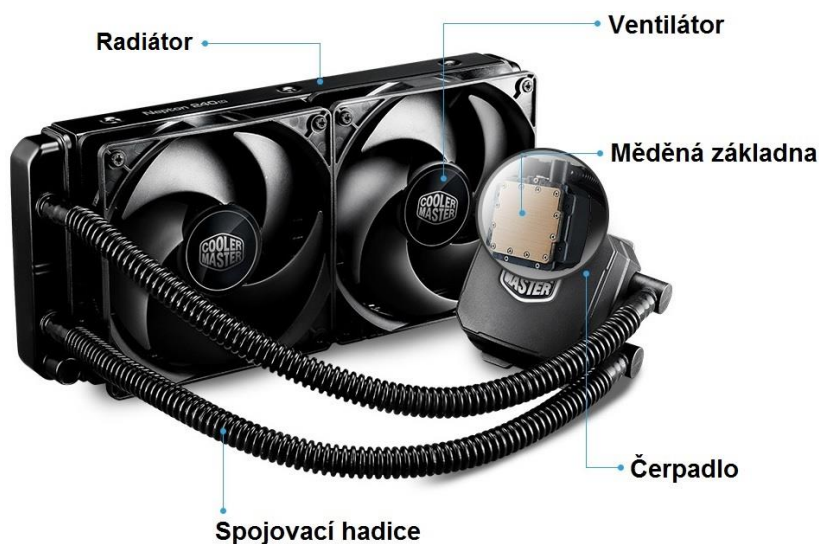
O problematice heat pipe podrobně pojednává publikace „*Heat pipes: Theory, Design and Applications*“ [15].

4.5 Vodní chladič

4.5.1 Výhody a nevýhody vodního chladiče

Progresivní vývoj metody vodního chlazení postupuje společně se zvyšujícím se množstvím tepla produkovaného počítačovými komponentami. Využití této technologie se nabízí v případech, kdy jsou kladeny nároky na bezhlučnost a především na chlazení vysokých tepelných výkonů, kdy by se klasický kombinovaný chladič nedal použít. Zejména při chlazení některých přetaktovaných procesorů je vyžadován velice rozměrný konvenční chladič, který může zapříčinit kolizi s ostatními komponentami v PC boxu. Další výhodou je nasnadě – většina vodních chladičů má radiátor umístěn vně PC boxu a teplo je tedy odváděno přímo mimo skříň a požadavek na její odvětrávání není tak vysoký jako při použití klasického chlazení. Jedním chladičem je navíc možné chladit i ostatní komponenty, jako grafickou kartu, pevný disk, chipset aj.

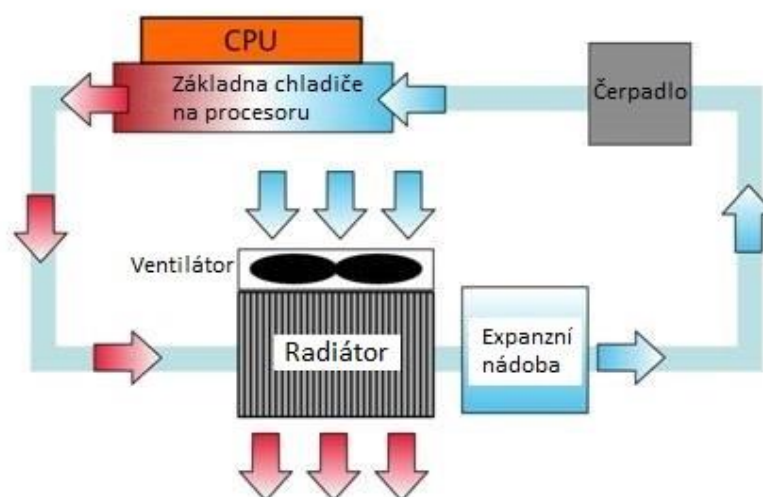
Zásadní nevýhodou vodního chlazení je jeho cena, která je několikanásobná v porovnání s kombinovanými chladiči. Dalším negativem je vyšší nárok na údržbu – kontrola stavu chladicí kapaliny a její doplňování, odvzdušňování, kontrola stavu těsnění aj. Moderní chladicí systémy, jako i níže zmíněný Cooler Master Nepton 240M (obr. 4.5 – 1), jsou naplněny tekutinou již z výroby, a ačkoli mají plnicí otvor, výrobce uvádí, že kapalinu není nutno kontrolovat ani měnit po celou dobu životnosti.



Obr. 4.5 – 1: vodní procesorové chlazení Cooler Master Nepton 240M [9]

4.5.2 Okruh vodního chladiče

Podívejme se nyní podrobněji pomocí (obr. 4.5 – 2) na funkci vodního chlazení. Chladicí kapalina se nejprve nachází v expanzní nádobě. Ta slouží jako zásobárna kapaliny a podstatnou roli hraje při jejím dolévání a odvzdušňování chladiče. Odtud proudí spojovací hadicí do čerpadla, kterým je tlačena do tělesa měděné základny připevněné na procesoru, ve které projde soustavou kanálků. V kanálkách dojde k předání tepla z měděné základny, resp. z procesoru, kapalině. Následuje opět přečerpání spojovací trubicí do radiátoru, kde se kapalina proudem vzduchu vyvozeným ventilátory ochladí, a celý cyklus se opakuje.



Obr. 4.5 – 1: schéma oběhu chladicího média vodního chlazení [17]

4.5.3 Účinnost vodního chladiče

Účinnost vodního chlazení je ovlivněna řadou faktorů. Je podmíněna především velikostí a provedením radiátoru, zpracováním tělesa připevněného na procesor, správným odvzdušněním celé soustavy, stejně jako u konvenčních chladičů i použitou teplovodivou pastou, u aktivně chlazených radiátorů výkonem ventilátorů a dalšími méně podstatnými parametry.

4.6 Srovnání typů procesorových chladičů

Na závěr této kapitoly je vhodné porovnat zmíněné typy chladičů, a to pasivní, aktivní a vodní, v závislosti na maximálním chladicím výkonu (*tab. 4.6 – 1*). V této tabulce jsou uvedeny pouze přibližné dosažitelné hodnoty pro chlazení procesorů. Např. pro chlazení procesoru pomocí vodního chlazení je uvedena hodnota chladicího výkonu 250 W, při chlazení grafických karet stejnými typy chladičů je však možné docílit téměř trojnásobného výkonu. Tabulka obsahuje dále přibližné hodnoty dosažitelných tepelných odporů. Výrobci uvádí pro chladicí výkony doplňující podmínky, jako např. maximální teplotu okolí, typ patice procesoru aj.

Typ chladiče	Maximální chladicí výkon [W]	Tepelný odpor [$^{\circ}\text{C W}^{-1}$]
Pasivní chlazení	95	$> 0,50$
Kombinované chlazení	220	$> 0,15$
Vodní chlazení	250	$< 0,10$

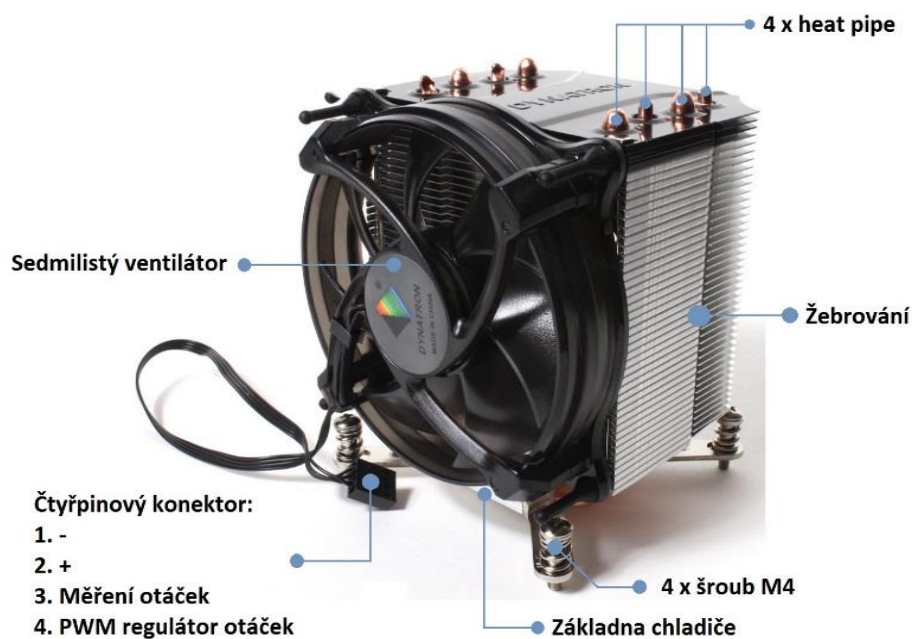
Tab. 4.6 – 1: dosažitelné hodnoty chladicích výkonů a tepelných odporů procesorových chladičů

5 Sestavení aparatury pro měření výkonové charakteristiky procesorového chladiče

V následující kapitole budou vysvětleny volby zařízení, resp. jejich význam pro následující experiment. Zaměříme se především na volbu chladiče procesoru a zpracování měděného tělesa, které bude použito namísto procesoru. Dále na výrobu podstavce, na kterém budou tyto součástky upevněny, a ostatní přístroje, pomocí kterých budeme experiment řídit a měřit hodnoty.

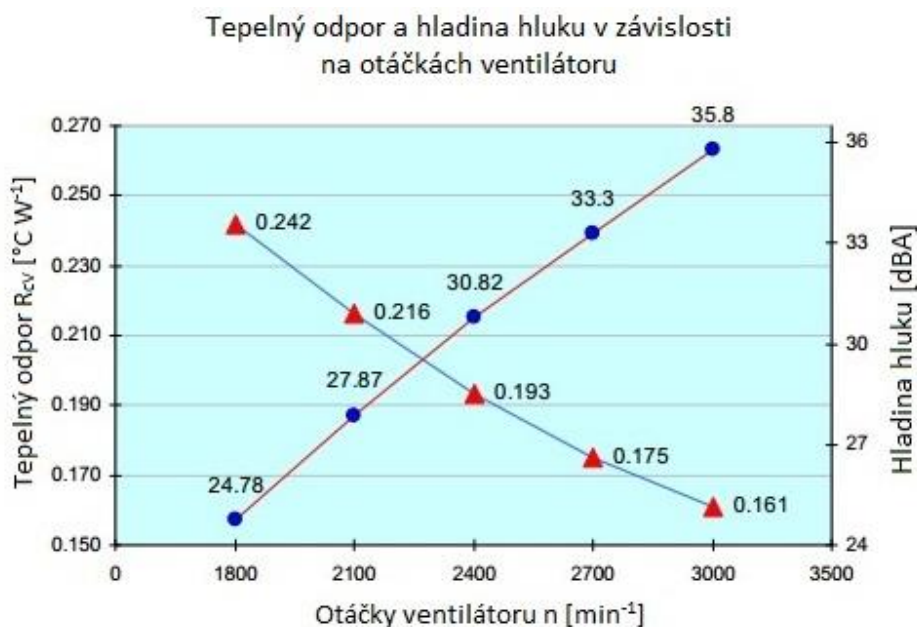
5.1 Výběr chladiče procesoru

Chladič procesoru je hlavním zařízením následujícího experimentu, a proto byla jeho výběru věnována odpovídající pozornost. Důraz byl kladen především na vysoký výkon okolo 150 W a rozsah technických informací poskytovaných výrobcem.



Obr. 5.1 – 1: aktivní chladič Dynatron R17 [5]

Jako chladič procesoru byl vybrán Dynatron R17 (*obr. 5.1 – 1*). Je to kombinovaný chladič pro vysoké výkony (až 160W) s hliníkovými žebry a čtyřmi měděnými heat pipe, které jsou zapuštěné do základny a odvádí teplo do žeber. Ventilátor pracuje v rozsahu otáček 1800 – 3000 min⁻¹. Výrobce Dynatron splnil kritérium, kdy u svých chladičů udává výkonovou charakteristiku (*graf 5.1 – 1*).



Graf 5.1 – 1: závislost tepelného odporu a hlučnosti na otáčkách ventilátoru udávaná výrobcem [1]

Tento graf poskytuje informace o tepelném odporu a hladině hluku v závislosti na otáčkách ventilátoru. Konkrétní výsledky jsou udávány pro 5 hodnot otáček (1800, 2100, 2400, 2700 a 3000 min⁻¹), přičemž sousední hodnoty jsou spojeny úsečkami. Závislost hladiny hluku je pro tento experiment nepodstatná a nebude využita, jelikož její měření je technicky náročné.

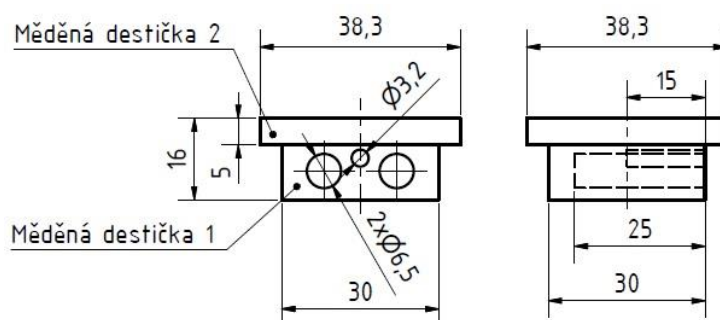
Doplňující informace o toleranci otáček, objemovém průtoku vzduchu a statickém tlaku vyozeným ventilátorem v závislosti na jeho procentuálním zatížení jsou shrnuty v (*tab. 5.1 – 1*).

	Zatížení ventilátoru [%]		
	0 – 20	50	100
Tolerance otáček	± 200 min ⁻¹	± 10 % min ⁻¹	± 10 % min ⁻¹
Objemový tok vzduchu [m ³ h ⁻¹]	29,461	53,026	73,669
Statický tlak [mm H ₂ O]	0,48	1,55	3,00

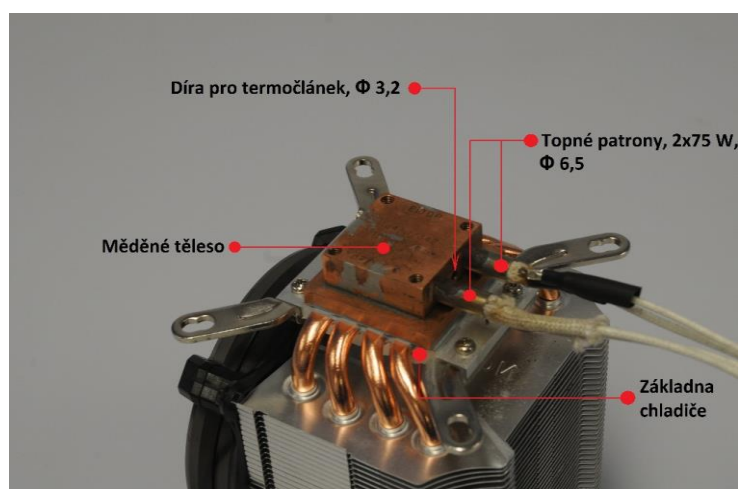
Tab. 5.1 – 1: informace o chladiči udávané výrobcem

5.2 Provedení měděného tělesa a topné patrony

Použití samotného procesoru jako zdroje tepla by bylo s ohledem na náročnou regulaci výkonu velmi složité, a proto bylo přistoupeno ke kombinaci dvou topných patron a měděného tělesa (obr. 5.2 – 1 a 5.2 – 2). Topné patrony o výkonu 2x75 W jsou snadno regulovatelné pomocí zdroje napětí a měděné těleso slouží k vedení tepla z patron do chladiče. Měděná destička 1 (obr. 5.2 – 1) je použita již z předchozího experimentu, přičemž na její horní část byla napájena měděná destička 2 z důvodu větší plochy základny chladiče Dynatron R17, než je plocha původně použité destičky 1. Použití celistvého tělesa by bylo vhodnější, jelikož v tomto případě vzniká určitý tepelný odpor spájených ploch a rohy podél rozhraní destiček mají též negativní vliv na vedení tepla z destičky 1 do destičky 2. Vzniklý tepelný odpor kontaktu destiček a vliv rohů si dovolíme zanedbat. Uložení tělesa na základně chladiče spolu s topnými patronami je na (obr. 5.2 – 2).



Obr. 5.2 – 1: provedení měděného tělesa ze dvou spájených destiček

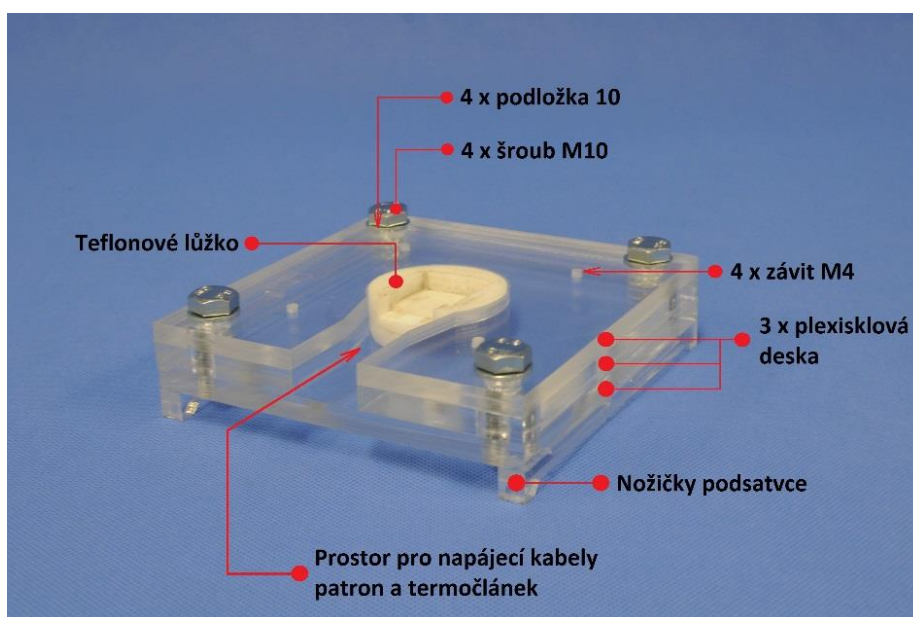


Obr. 5.2 – 2: uložení měděného tělesa s topnými patronami na základně chladiče

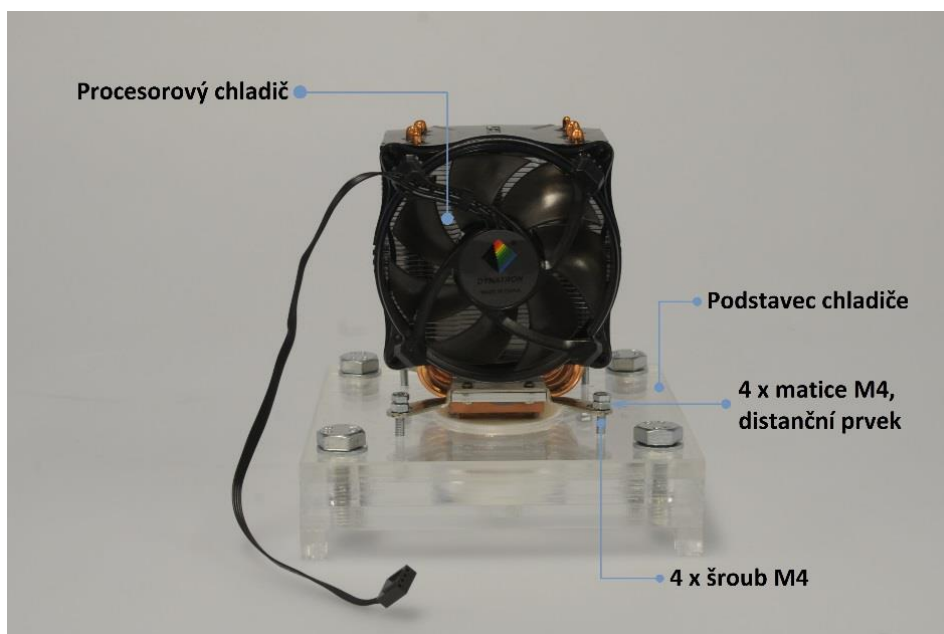
5.3 Konstrukce podstavce a teflonového lůžka

Použité topné patrony generují značné množství tepelné energie, a to se projeví při vyšším výkonu vysokou teplotou měděného tělesa. To je potřebné správně odizolovat od okolního prostředí, aby maximální tepelný tok směřoval do základny chladiče. K tomu se využijeme teflonového lůžka, které se následně zasadí do plexisklového podstavce. Tepelná vodivost teflonu je $0,23 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, plexiskla $0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a tyto materiály jsou proto vhodnými tepelnými izolanty. Ukázka modelu podstavce spolu s teflonovým lůžkem je na (obr. 5.3 – 1), dále na (obr. 5.3 – 2) je k vidění chladič připevněný na podstavec.

Podstavec se skládá ze tří desek spojených šrouby, kdy je vnitřními závity M10 opatřena pouze spodní deska a dvě horní obsahují průchozí díry. Ke spojení jsou použity 4 šrouby se šestihrannou hlavou M10. Ve vrchních deskách jsou vyříznuty průchody pro napájecí kabely topných patron a termočlánek, kterým budeme měřit teplotu měděného tělesa. Vrchní deska je dále opatřena čtyřmi závity M4, které slouží pro namontování chladiče. Na spodní desce je dále nalepen pár nožiček, který celý podstavec dodatečně izoluje od podkladu, na kterém bude celé zařízení umístěno.



Obr. 5.3 – 1: podstavec zhotovený z plexiskla a teflonové lůžko pro měděné těleso



Obr. 5.3 – 2: chladič zasazený do podstavce a zajištěný pomocí šroubů

Výpočet úniku tepelného výkonu skrz spodní desku podstavce

Pro takto navržený podstavec je možné vypočítat, kolik tepelného výkonu uniká skrz teflon a následně plexisklovou desku do okolí. Tuto úlohu lze řešit pomocí vztahu (3 – 7). Výpočet je proveden pouze pro únik tepla skrz spodní podstavu. Výpočet zohledňuje nejvíce nepříznivé podmínky, které nastaly v následujícím experimentu. Pro výpočet je využita teplota okolí $T_{ok} = 20,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ a teplota měděného tělesa $T_{MT} = 56,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ z (tab.6.3 – 1 c). Spodní plocha destičky je $A = 900 \text{ mm}^2$, tepelné vodivosti teflonu a plexiskla jsou dle výše zmíněného: $\lambda_{tefl} = 0,23 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ a $\lambda_{pl} = 0,2 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Tloušťka teflonu je $\delta_{tefl} = 5 \text{ mm}$ a tloušťka spodní desky z plexiskla je $\delta_{pl} = 10 \text{ mm}$. Součinitel přestupu tepla mezi spodní deskou a vzduchem budeme předpokládat $\alpha = 10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= k (T_{MT} - T_{ok}) A = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha}} (T_{MT} - T_{ok}) A = \frac{1}{\frac{\delta_{tefl}}{\lambda_{tefl}} + \frac{\delta_{pl}}{\lambda_{pl}} + \frac{1}{\alpha}} (T_{MT} - T_{ok}) A = \\ &= \frac{1}{\frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,23} + \frac{10 \cdot 10^{-3}}{0,2} + \frac{1}{10}} (56,9 - 20,3) 900 \cdot 10^{-6} = 0,19 \text{ W} \end{aligned}$$

Uniklý tepelný výkon skrze podstavu je i v nejnepříznivějším případě vzhledem k výkonům topných patron velmi malý, a proto ho zanedbáme. I při uvažování úniků tepla po stranách měděného tělesa bude tento tepelný tok velice malý.

5.4 Měřicí přístroje

V následujícím bude vysvětlen princip řízení experimentu a odečítání hodnot na konkrétních přístrojích.

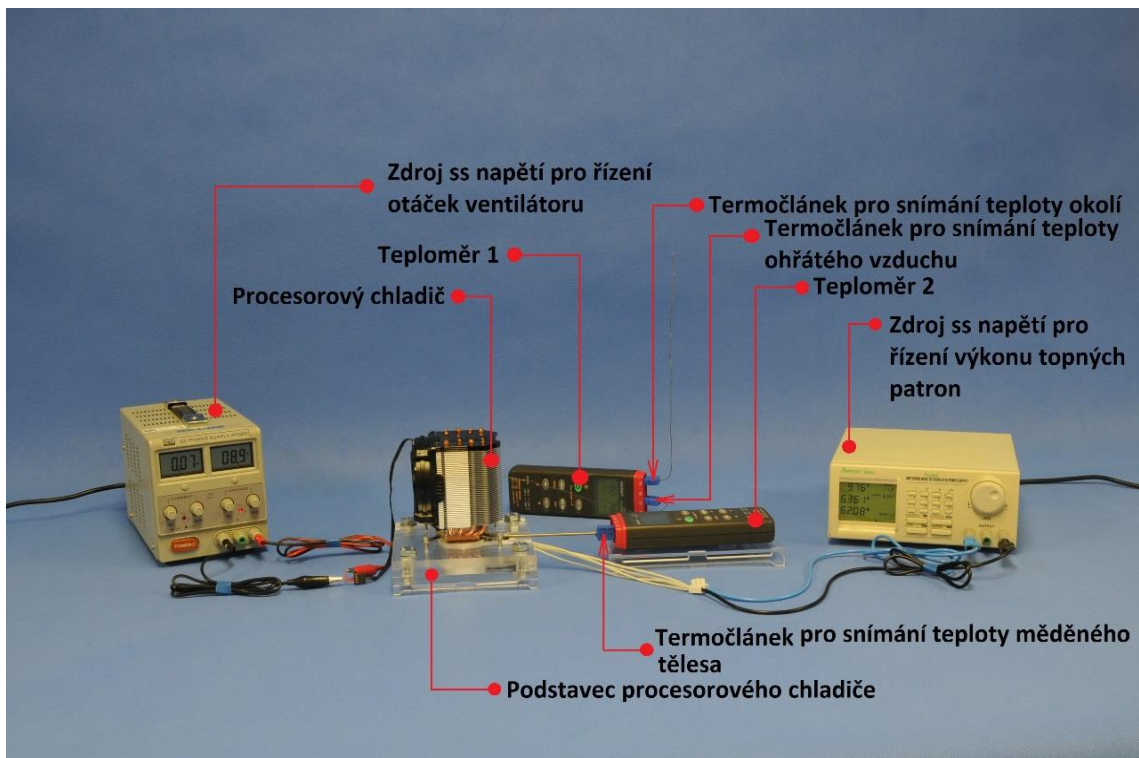
Pomocí dvou stejnosměrných zdrojů napětí budou regulovány otáčky ventilátoru a výkon topných patron paralelně zapojených o maximálním tepelném výkonu 150 W. Dva termočlánky typu T, \varnothing 1 mm jsou použity ke snímání teplot okolí a těsně za chladičem, odkud bude proudit ohřátý vzduch. Teplota měděného tělesa je měřena termočlánkem stejného typu, \varnothing 3,2 mm. Teplota proudu vzduchu za ventilátorem a teplota okolí je odečítána na teploměru 1, teplota měděného tělesa na teploměru 2. Snímek měřicí aparatury je na (obr. 5.4 – 1). Tyto hodnoty jsou použity k výpočtu celkového tepelného odporu R_c chladiče pomocí vztahů uvedených v následující kapitole.

Pozn.: Teplota ohřátého vzduchu za chladičem pro vyhodnocení nebyla nakonec použita. Metoda vyhodnocení naměřených hodnot bude blíže vysvětlena v kapitole 6.2.

Bližší informace o použitých přístrojích poskytuje následující výčet:

1. 2 x digitální teploměr VOLTcraft K204
(Odečítání teplot okolí, proudu vzduchu za chladičem a měděného tělesa.)
2. 2 x termočlánek, typ T, \varnothing 1 mm
(Snímání teploty okolí a ohřátého proudu vzduchu za chladičem.)
3. 1 x termočlánek, typ T, \varnothing 3,2 mm
(Snímání teploty měděného tělesa.)
4. 1 x laboratorní zdroj ss napětí DC POWER SUPPLY HY3003D
(Řízení otáček ventilátoru.)

5. 1 x laboratorní zdroj ss napětí MANSION SDP2210
(Řízení výkonu topných patron. Jeho výhodou je zobrazení dodávaného výkonu.)
6. 1 x snímač otáček TACHOMETER VOLTMETER
(Použit pouze pro zjištění otáčkové charakteristiky ventilátoru.)



Obr. 5.4 – 1: aparatura pro měření výkonové charakteristiky procesorového chladiče

6 Experimentální zjištění výkonové charakteristiky procesorového chladiče a vyhodnocení

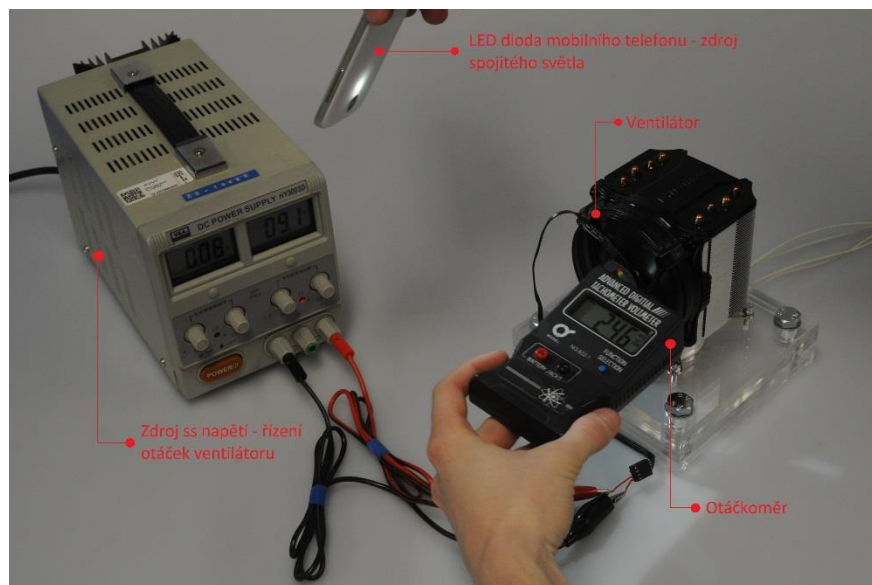
6.1 Změření otáčkové charakteristiky ventilátoru

Před započítím vlastního měření bylo výhodné zjistit otáčkovou charakteristiku použitého ventilátoru. Při znalosti této charakteristiky je možné snadno regulovat otáčky ventilátoru pomocí zdroje ss napětí. Bez její znalosti by bylo nutné vždy při změně napětí, kterým byl ventilátor řízen, ověřit otáčky pomocí otáčkoměru, což by podstatně ztěžovalo celé řízení experimentu. Otáčky byly měřeny ve stavu, kdy je ventilátor připevněn na chladič. V případě, že by ventilátor nebyl umístěn na chladiči, změnila by se charakteristika nezatiženého ventilátoru vlivem jiných tlakových rozdílů před ventilátorem a za ním.

Při měření pomocí použitého otáčkoměru TACHOMETER VOLTMETER je předmět osvětlován světlem se spojitým spektrem. Při použití výbojek tento otáčkoměr měří primárně frekvenci těchto výbojek. Postačující je použití např. LED světla z mobilního telefonu (*obr. 6.1 – 1*).

Níže je shrnut postup, jakým bylo docíleno otáčkové charakteristiky ventilátoru, který je již připojen na zdroj ss napětí:

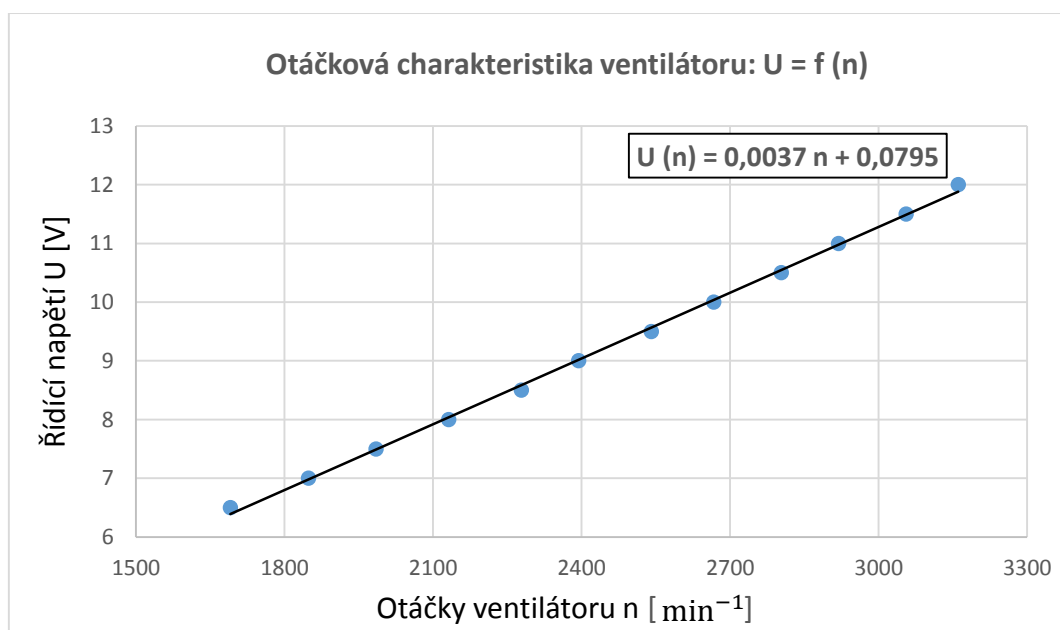
1. Osvětlení ventilátoru pomocí LED světla.
2. Nastavení počátečního napětí 6 V na ss zdroji napětí.
3. Na otáčkoměru vybereme počet lopatek ventilátoru: 2. Následně provedeme korekci.
4. Přiložení otáčkoměru k rotujícímu ventilátoru a odečtení hodnoty otáček.
5. Odečtenou hodnotu vynásobíme zlomkem $\frac{7}{2}$, jelikož skutečný počet listů ventilátoru je 7.
6. Napětí na ss zdroji napětí zvyšujeme po 0,5 V.
7. Opakujeme body 4 a 6 až do hodnoty 12 V.



Obr. 6.1 – 1: snímání otáček pomocí přístroje TACHOMETER VOLTMETER

Z takto získaných hodnot otáček a řídicího napětí byla následně sestavena otáčková charakteristika (graf 6.1 – 1). Body je možné proložit přímkou, jejíž rovnice má tvar

$$U(n) = 0,0037n + 0,0795 \quad [\text{V}] \quad (6.1 - 1)$$



Graf 6.1 – 1: závislost napětí na otáčkách ventilátoru

Z rovnice proložené přímkou (6.1 – 1) je možné dosazením požadovaných otáček sestavit tabulku závislosti otáček na napětí (tab. 6.1 – 1). Následující experiment byl proveden pouze pro 5 hodnot otáček, a to: 1800, 2100, 2400, 2700 a 3000 min⁻¹. Zjišťování tepelného odporu pro větší počet otáček by na přesnost výsledků nemělo výraznější vliv.

Otáčky n [min ⁻¹]	1800	2100	2400	2700	3000
Napětí U [V]	6,7	7,8	9	10,1	11,2

Tab. 6.1 – 1: napětí pro hodnoty otáček ventilátoru, při kterých byl zjišťován tepelný odpor procesorového chladiče

6.2 Metody vyhodnocení

V této stati jsou představeny použité metody pro vyhodnocení výkonové charakteristiky, resp. celkového tepelného odporu chladiče Dynatron R17 a je vysvětleno, proč byla použita daná metoda vyhodnocení.

Rozeberme měřené teploty. V ideálním případě by bylo nutné zjistit střední teplotu proudícího vzduchu uvnitř chladiče a vztáhnout ji k teplotě měděného tělesa. Teplotu měděného tělesa lze změřit snadno s použitím výše zmíněného termočlánku. Zjištění střední teploty vzduchu uvnitř chladiče je ovšem obtížné.

Pro výpočet celkového odporu lze použít následující zjednodušenou metodu, která zohledňuje pouze teplotu měděného tělesa, a teplotu okolí a výsledný tepelný odpor vypočítáme ze vztahu

$$R_{CA} = \frac{T_{MT} - T_{ok}}{\dot{Q}} \quad [^{\circ}\text{C W}^{-1}] \quad (6.2 - 1)$$

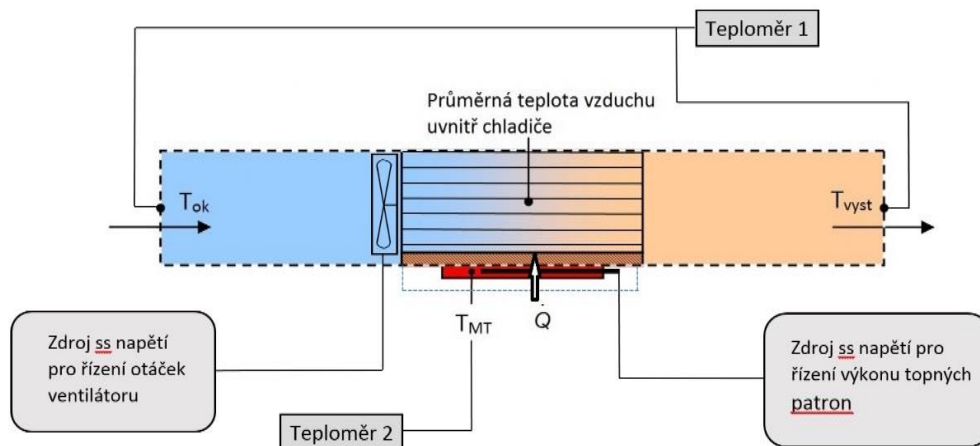
T_{MT} je teplota měděného tělesa, T_{ok} je teplota okolí a \dot{Q} je výkon topných patron, který řídíme pomocí zdroje ss napětí. Vztah (6.2 – 1) je analogií vztahu (3 – 8), vyjádří-li se tepelný odpor R. Pro názornost schéma aparatury (obr. 6.2 – 1) za předpokladu, že není uvažována teplota vzduchu na výstupu T_{vyst} . **Tato metoda je v dalším nazývána pouze jako metoda A** a vyhodnocení měření je provedeno pouze pro tuto metodu.

Nastíníme zde i další možnou metodu, která zohledňuje výstupní teplotu proudícího vzduchu, a místo teploty okolí T_{ok} ve vztahu (6.2 – 1) počítá s aritmetickým průměrem okolní teploty a teploty ohřátého vzduchu. Výsledný vztah vypadá následovně:

$$R_{cB} = \frac{T_{MT} - \frac{T_{vyst} + T_{ok}}{2}}{\dot{Q}}, \quad [^{\circ}\text{C W}^{-1}] \quad (6.2 - 2)$$

kde T_{vyst} je teplota proudícího vzduchu změřená na výstupu z chladiče. Tento vztah by měl vést teoreticky k přesnějšímu výsledku, jelikož alespoň částečně odhaduje teplotu uvnitř chladiče, resp. střední teplotu vzduchu, při které probíhá přestup tepla mezi žebry chladiče a vzduchem, a díky tomuto je i blíže vztahu (3 – 8). Uvažovanou teplotu uvnitř chladiče reprezentuje druhý člen v čitateli ve vztahu (6.2 – 2). V tomto případě odpovídá schéma (obr. 6.2 – 1), včetně měřené teploty vzduchu na výstupu, právě této metodě.

Celá problematika je o to složitější, že teplota vzduchu v těsné blízkosti za chladičem představuje dvojrozměrný problém a mění se se souřadnicemi, jelikož teplota žebry též není konstantní, jak bude následně znázorněno na termosnímčích (obr. 6.2 – 1). Pro tuto metodu by bylo vhodné použít trubici, která by se napojila na výstup žebry, a v té by se v určité vzdálenosti měřila teplota ohřátého vzduchu.



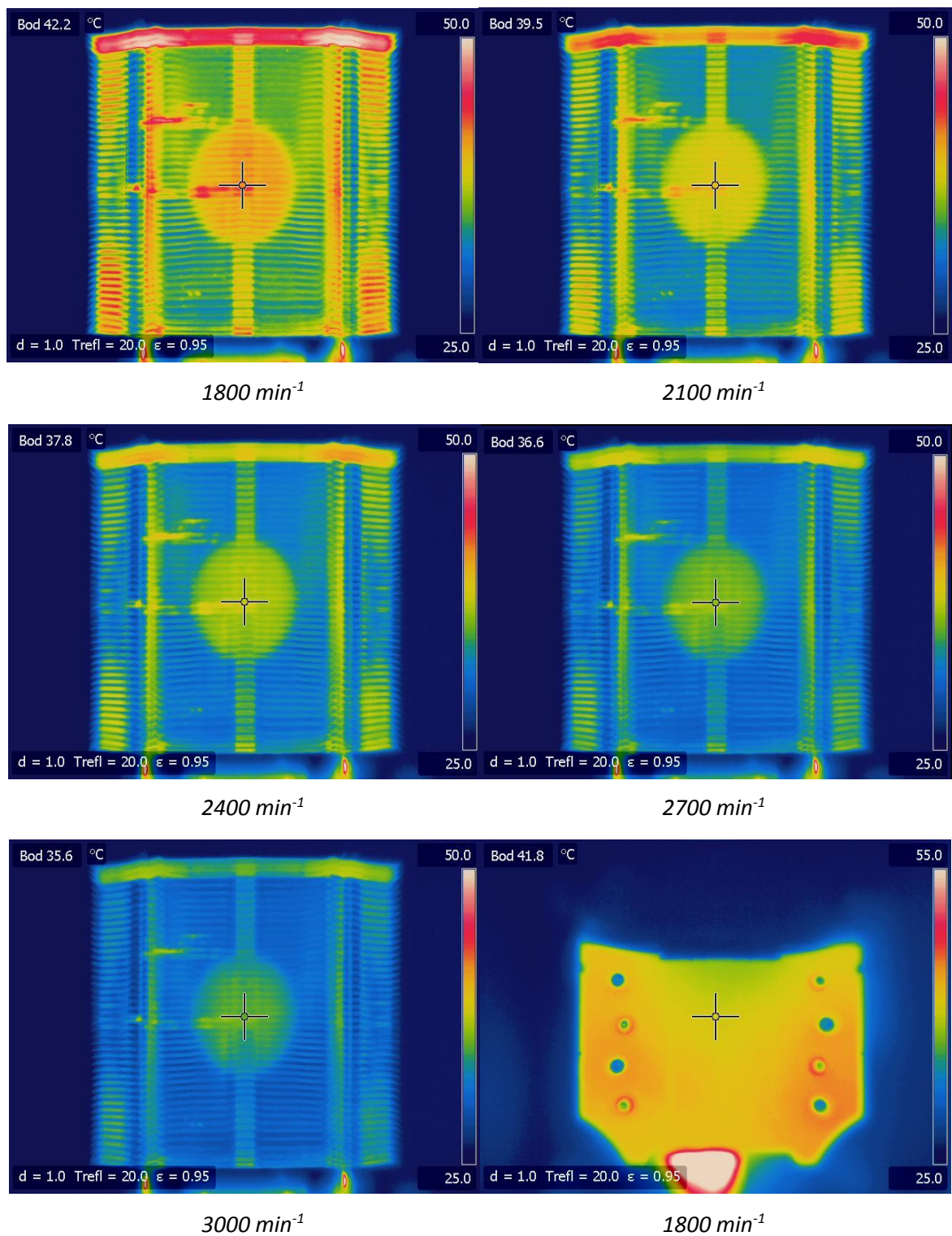
T_{ok} : teplota okolního vzduchu

T_{vyst} : teplota vzduchu na výstupu z chladiče

T_{MT} : teplota měděného tělesa

\dot{Q} : tepelný tok z topných patron do měděného tělesa, resp. do základny chladiče

Obr. 6.2 – 1: schéma aparatury s důrazem na měřené teploty



Obr. 6.2 – 2: termosnímký procesorového chladiče pro výkon topných patron 140 W pořízené ze strany výstupu ohřátého vzduchu pro hodnoty otáček 1800, 2100, 2400, 2700 a 3000 min⁻¹; vpravo dole termosnímek vrchní části chladiče pro stejný výkon a otáčky 1800 min⁻¹

Pokud by bylo přistoupeno k vyhodnocení pomocí B dle vztahu (6.2 – 2), aniž by byla k dispozici zmíněná trubice a teplota proudícího vzduchu na výstupu by byla měřena v libovolném místě těsně za žebry, tak změna polohy tohoto termočlánku měřícího teplotu ohřátého vzduchu by vedla ke značně rozdílným výsledkům, jelikož jak vyplývá z termosnímku (obr. 6.2 – 2), teploty jednotlivých částí žeber se značně liší a spolu s nimi i teplota proudícího vzduchu. Z tohoto důvodu je nejvýhodnější použití metody A, při které lze poměrně přesně změřit teplotu měděného tělesa i teplotu okolí a hodnotu výkonu topných patron odečíst ze zdroje stejnosměrného napětí. Ačkoli sestavená aparatura poskytuje měření teploty výstupního vzduchu, tato teplota z výše zmíněného důvodu není dále využívána.

Pozn.: Na (obr. 6.2 – 2) je možné vidět značný skok barev mezi vrchními třemi žebry a ostatními žebry chladiče. Toto není dáno jejich vyšší teplotou, ale rozdílnou odrazivostí materiálu, jelikož tato tři vrchní žebra mají povrchovou úpravu nátěrem.

6.3 Změření výkonové charakteristiky procesorového chladiče, vyhodnocení a diskuse

V této chvíli, kdy je uveden potřebný teoretický podklad a sestavena měřící aparatura, je možné přistoupit k samotnému měření a vyhodnocení. Při vyhodnocování jsou zároveň tyto výsledky diskutovány.

Postup měření

Při měření požadovaných hodnot bylo postupováno následujícím způsobem. Nejprve byl nastaven požadovaný výkon na ss zdroji, jímž se určoval tepelný výkon patron (tento zdroj již disponuje ukazatelem výkonu). Následně se na druhém zdroji ss napětí, který zajišťuje řízení otáčky ventilátoru, nastavila hodnota napětí pro 1800 min⁻¹. Po ustálení teploty měděného tělesa následovalo odečtení teploty T_{MT} a teploty okolí T_{ok} . Teplota T_{ok} byla po celou dobu experimentu prakticky konstantní, a proto jsou v (tab. 6.3 – 1) tyto hodnoty vždy pro daný výkon.

Vyhodnocení a diskuse

Pomocí naměřených teplot okolního vzduchu T_{ok} a měděného tělesa T_{MT} byly vypočítány tepelné odpory kombinovaného chladiče Dynatron R17 pro výkony topných patron 50, 100 a 140 W.

Hodnoty tepelných odporů R_{cA} pro zvolenou metodu A byly získány pomocí vztahu (6.2 – 1) a následující tabulka (tab. 6.3 – 1 a, b, c) obsahuje tyto výsledky pro uvedené hodnoty výkonů patron. Pro porovnání zjištěných hodnot tepelného odporu s výrobcem je v každé tabulce uveden tento odpor R_{cV} poskytnutý výrobcem. O tomto tepelném odporu R_{cV} nejsou k dispozici další informace, pro jaký tepelný výkon byl získán, a proto je uveden v každé tabulce.

T_{ok} [°C]		Výkon [W]	
20,5		50	
Otáčky	T_{MT} [°C]	R_{cA} [°C W ⁻¹]	R_{cV} [°C W ⁻¹]
1800	33,8	0,266	0,242
2100	32,4	0,238	0,216
2400	31,3	0,216	0,193
2700	30,5	0,200	0,175
3000	30,0	0,190	0,161

a)

T_{ok} [°C]		Výkon [W]	
20,5		100	
Otáčky	T_{MT} [°C]	R_{cA} [°C W ⁻¹]	R_{cV} [°C W ⁻¹]
1800	46,9	0,264	0,242
2100	44,4	0,239	0,216
2400	42,3	0,218	0,193
2700	40,7	0,202	0,175
3000	39,5	0,190	0,161

b)

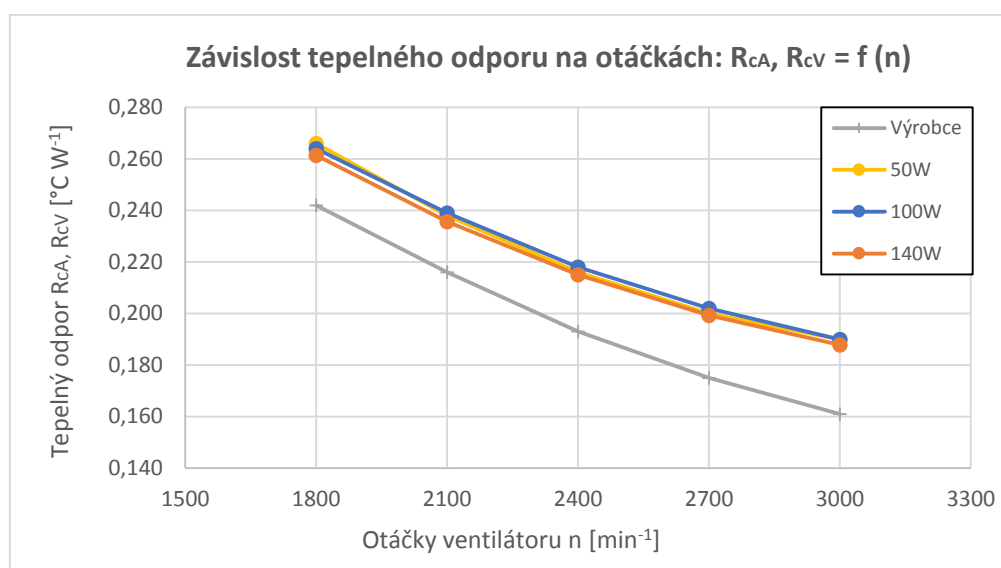
T_{ok} [°C]		Výkon [W]	
20,3		140	
Otáčky	T_{MT} [°C]	R_{cA} [°C W ⁻¹]	R_{cV} [°C W ⁻¹]
1800	56,9	0,261	0,242
2100	53,3	0,236	0,216
2400	50,4	0,215	0,193
2700	48,2	0,199	0,175
3000	46,6	0,188	0,161

c)

Tab. 6.3 – 1: hodnoty změřených teplot měděného tělesa T_{MT} a vypočítaných tepelných odporů R_{cA} v závislosti na otáčkách ventilátoru pro výkony topných patron 50 W (a), 100 W (b) a 140 W (c)

Pro tepelný odpor chladiče by mělo platit, že na měnícím se tepelném výkonu nezávisí a měl by být přibližně konstantní pro dané otáčky. Pokud se ovšem mění, měl by se s vyšším tepelným výkonem nepatrně snižovat, jelikož roste vliv volné konvekce. Tato teorie se nám potvrzuje při porovnání výkonu 140 W se zbylými 50 W a 100 W, kdy jsou hodnoty R_{cA} pro 140 W skutečně nižší. Při porovnání výkonů 50 W a 100 W toto neplatí. Lze to vysvětlit i tím, že bylo počítáno s číselnými hodnotami teplot o jednom desetinném čísle a výsledek nemůže poskytnout takto přesnou informaci.

Vyneseme-li hodnoty získaných tepelných odporů R_{cA} a hodnoty udávaných výrobcem R_{cV} v závislosti na otáčkách ventilátoru n , získáme (graf 6.3 – 1).



Graf 6.3 – 1: závislost tepelného odporu na otáčkách ventilátoru získaná metodou A, $R_{cA} = f(n)$

Z (graf 6.4 – 1) je zřejmé, že výsledky zjištěné metodou A sledují hodnoty výrobce s určitou odchylkou, která se směrem k vyšším otáčkám zvětšuje. Tato odchylka mohla vzniknout při použití jiné metody vyhodnocení (např. výpočtem pomocí vztahu (6.2 – 2), nebo za použití kriteriálních rovnic (viz. kapitola 2.2 *Kriteriální rovnice*) nebo jiného postupu). Výrobce o způsobu měření a vyhodnocování neuvádí bližší specifikata. Dále nebylo k dispozici, při jakých teplotách okolí tato data výrobce získal a pro jaký výkon. Lze se ovšem domnívat, že provedl měření při vyšší teplotě a vysokém výkonu, aby zjistil hodnoty pro extrémnější podmínky. Vyšší teplota okolí by však vedla k vyšším hodnotám tepelného odporu a pokud by výrobce použil stejnou metodu jako my, získal by vyšší hodnoty tepelných odporů. Z tohoto se usoudit, že použil k vyhodnocení jinou metodu.

Dále byla provedena analýza odchylek (tab. 6.3 – 1). Vypočtou-li se číselně hodnoty odchylek δ tepelných odporů R_{cA} a R_{cV} , je možné sestavit (tab. 6.3 – 2). Hodnoty udávané výrobcem slouží jako

referenční a jsou k nim vztaženy naměřené hodnoty. Z odchylek tepelných odporů R_{cA} a R_{cV} je zaznamenán růst těchto odchylek s růstem otáček ventilátoru, jak bylo patrné již z (graf 6.3 – 1).

Výkon [W]	50	100	140
Otáčky ventilátoru [min^{-1}]	Odchylka δ tepelných odporů R_{cA} a R_{cV} [%]		
1800	9,9	9,1	8,0
2100	10,2	10,6	9,1
2400	11,9	13,0	11,4
2700	14,3	15,4	13,9
3000	18,0	18,0	16,7
Průměrná odchylka $\bar{\delta}$ [%]	12,9	13,2	11,8

Tab. 6.3 – 2: hodnoty odchylek tepelných odporů R_{cA} získaných metodou A a udávaných výrobcem R_{cV}

Nejnižší hodnotu průměrné odchylky jsme získali pro výkon 140 W a to 11,8 %, pro 50 W činí 12,9 % a pro 100 W je odchylka nejvyšší, a to 13,2 %. Vliv na tyto odchylky může mít dále způsob měření teploty měděného tělesa T_{MT} . Teplota tohoto tělesa byla měřena ve spodní destičce 1, kdežto kontakt mezi základnou chladiče a měděným tělesem je realizován prostřednictvím horní destičky 2 (obr. 5.2 – 2). Teploty v těchto místech se mohou nepatrně lišit vlivem rohů a tepelného odporu styku těchto destiček, jelikož netvoří homogenní těleso, a určitý vliv bude mít i tepelný odpor samotného měděného tělesa.

Dále bylo výhodné využít dílčí normované odchylky, která je pro tento případ vhodnější. Výpočet byl proveden podle následujícího vztahu

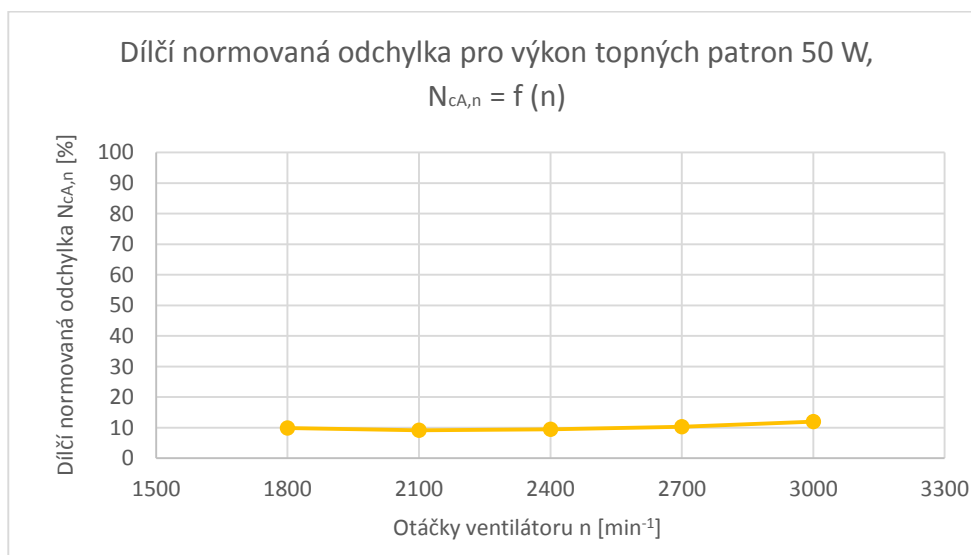
$$N_{cA,n} = \frac{R_{cA,n} - R_{cV,n}}{S_{RV}} 100, \quad [\%] \quad (6.3 - 1)$$

kde $R_{cA,n}$ je hodnota tepelného odporu pro daný měřený výkon \dot{Q} a otáčky n získaná metodou A, $R_{cV,n}$ je hodnota tepelného odporu výrobce pro stejné otáčky n a S_{RV} je hodnota, na kterou je normováno – v tomto případě maximální hodnota tepelného odporu udávaná výrobcem: $R_{cV} = 0,242 \text{ } ^\circ\text{C W}^{-1}$. Následující (tab. 6.3 – 3) shrnuje takto vypočítané hodnoty $N_{cA,n}$.

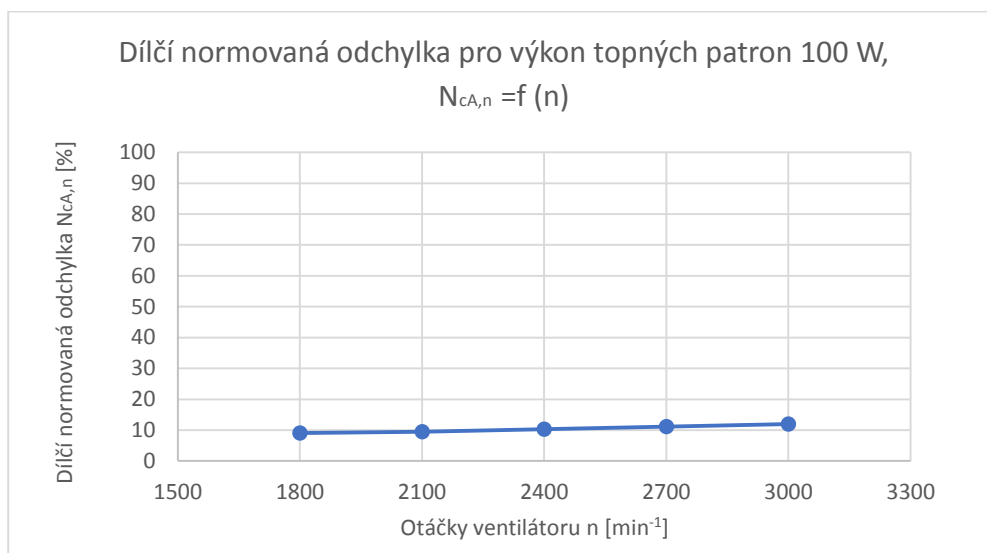
Výkon [W]	50	100	140
Otáčky ventilátoru [min^{-1}]	Dílčí normovaná odchylka $N_{cA,n}$ [-]		
1800	9,9	9,1	8,0
2100	9,1	9,5	8,1
2400	9,5	10,3	9,1
2700	10,3	11,2	10,0
3000	12,0	12,0	11,1
Průměrná dílčí normovaná odchylka $\bar{N}_{cA,n}$ [%]	10,2	10,4	9,3

Tab. 6.3 – 3: hodnoty dílčích normovaných odchylek tepelných odporů pro měřené výkony topných patron a otáčky ventilátoru

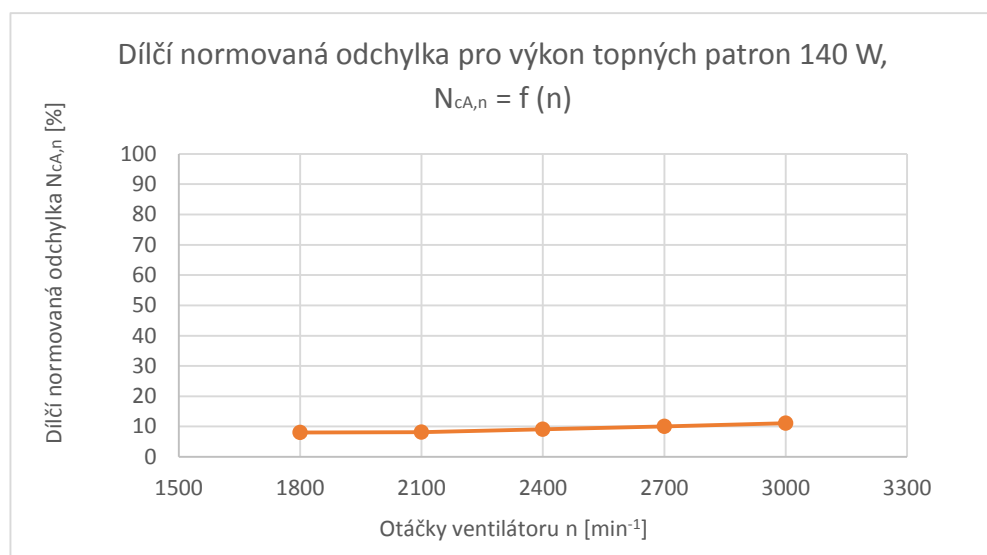
Hodnoty z (tab 6.3 – 3) jsou pro grafickou představu vyneseny v (graf. 6.3 – 2). Jak je již patrné z tabulky, hodnoty normovaných odchylek se liší nepatrně a jsou téměř konstantní. Pohybují se okolo hodnoty 10 % pro všechny měřené výkony. Nejnižší průměrná dílčí normovaná odchylka $\bar{N}_{cA,n}$ je pro 140 W, dále pro 50 W a nejvyšší pro 100 W tepelného výkonu patron.



a)



b)



c)

Graf. 6.3 – 2: závislosti dílčích normovaných odchylek tepelných odporů na otáčkách ventilátoru pro měřené výkony topných patron: 50 W, b) 100 W, c) 140 W

7 Závěr

Cílem této práce bylo provést měření výkonové charakteristiky procesorového chladiče pomocí aparatury, který měla být též pro toto měření navržena a sestavena. Části, která se experimentu, předcházejí úvodní kapitoly, kde jsou zmíněny základní zákony termodynamiky a současně připravují teoretický podklad pro experiment, který tvoří hlavní část této práce.

Pro experimentální měření výkonové charakteristiky procesorového chladiče byla vyrobena a sestavena vhodná aparatura a tato charakteristika pro zvolený kombinovaný chladič změřena. Před vlastním měřením tepelného odporu byla zjištěna pomocí otáčkoměru otáčková charakteristika ventilátoru v závislosti na napětí, čímž se dále usnadnilo řízení experimentu. Pro vyhodnocení tepelného odporu se přistoupilo k použití zjednodušené metody, při které měřili teploty měděného tělesa a okolního vzduchu pro různé tepelné výkony patron v závislosti na otáčkách ventilátoru. Tato metoda byla využita z důvodu opakovatelnosti takto zjištěných výsledků. Pro ostatní zmíněné metody vyhodnocení by bylo zapotřebí měřící aparaturu dále rozšířit.

Při porovnání námi zjištěných výsledků tepelných odporů s těmi, které uvádí výrobce, byly vypočítány odchylky a dále dílčí normované odchylky vůči výrobcu, kdy se u normované odchylky využila jako normovaná hodnota nejvyšší tepelný odpor udávaný výrobcem. Výpočtem byly zjištěny následující průměrné odchylky $\bar{\delta}$: 12,9 % pro výkon patron 50 W, 13,2 % pro 100 W a 11,8 % pro 140 W. Odchylky s rostoucími otáčkami značně rostly, a proto byly vypočítány i dílčí normované odchylky $\bar{N}_{cA,n}$. Tyto normované odchylky ukázaly, že chyba je přibližně konstatní a pohybuje se okolo 10 % pro všechny změřené výkony. Průměrné dílčí normované odchylky $\bar{N}_{cA,n}$ vyšly následovně: 10,2 % pro výkon patron 50 W, 10,4 % pro 100 W a 9,3 pro 140 W.

Rozdílné výsledky naměřených hodnot vzhledem k výrobcu jsou dány pravděpodobně odlišnou metodou měření, o které nemáme bližší informace. Určitá chyba mohla vzniknout též při měření teploty měděné destičky, kdy by bylo vhodnější tento termočlánek umístit ve styku měděného tělesa a základny chladiče.

Výsledek experimentu splnil očekávání. Předpokládalo se pouze o něco vyšší přiblížení k hodnotám udávaných výrobcem.

8 Zdroje

- [1] Active Cooler R17 Cooling Performace VS. Fan Speed & Acoustical Level. *dynatron – corp* [online]. [cit. 26. března 2015]. Dostupné z WWW: <http://www.dynatron-corp.com/en/product_detail_1.aspx?cv=&id=239&in=0>
- [2] Coolermaster TPC 600. *mironet.cz* [online]. [cit. 1. dubna 2015]. Dostupné z WWW: <<https://www.mironet.cz/coolermaster-tpc-600-chladic-cpu-pasivni-2011-1366-1156-1155-775-amd-fm1-am3-am3-am2-am2+dp213811/>>
- [3] CNPS – 9700 schematic diagram. *openlab.cytitech.cuny* [online]. © 2012 Elsevier Ltd. [cit. 7. dubna 2015]. Dostupné z WWW: <<https://openlab.citytech.cuny.edu/envdesign/files/2012/09/A-new-CPU-cooler-design-based-on-an-active-cooling-heatsink-combined.pdf>>
- [4] DVOŘÁK, Zdeněk. *Sdílení tepla a výměníky*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1992. 120 s. Učební texty VŠ, ČVUT - fak. strojní. ISBN 80 – 01 – 000830 – 4.
- [5] Dynatron R17. *dynatron – corp* [online]. [cit. 26. března 2015]. Dostupné z WWW: <http://www.dynatron-corp.com/en/product_detail_1.aspx?cv=&id=239&in=0#>
- [6] Flow Acceleration Channels. *noctua* [online]. © 2012 Noctua. [cit. 20. března 2015]. Dostupné z WWW: <http://www.noctua.at/main.php?show=flow_acceleration_channels&setlng=en&products_id=&news_id>
- [7] Heat pipe & Wick Structure. *mkicorp* [online]. © Dynapore. [cit. 5. dubna 2015]. Dostupné z WWW: <<http://www.mkicorp.com/a-t-heatpipes.asp>>
- [8] HEJZLAR, Radko. *Sdílení tepla*. Vyd. 4. Praha: ČVUT, 2004. 186 s. ISBN 80-01-02974-3.
- [9] Nepton 240 M. *coolermaster* [online]. © Cooler Master Corporation. [cit. 5. dubna 2015]. Dostupné z WWW: <<http://www.coolermaster.com/cooling/cpu-liquid-cooler/nepton-240m/>>
- [10] NF – A9x14 PWM. *noctua* [online]. [cit. 20. března 2015]. Dostupné z WWW: <<http://www.noctua.at/inc/imageviewer.php?item=49&pnr=0>>
- [11] NOŽIČKA, Jiří. *Sdílení tepla*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997. 238 s. ISBN 80 – 01 – 01599 – 8.
- [12] NOŽIČKA, Jiří. *Termomechanika*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1998. 179 s. ISBN 80 – 01 – 01836 – 9.
- [13] PALIČKA, Robin. *Dlouhodobá maturitní práce* [online]. [cit. 20. března 2015]. Dostupné z WWW: <http://www.dmp.spsei.cz/zdroje/skrine_chlazen.html>

- [14] PŘÍHODA, Miroslav, RÉDR, Miroslav. *Sdílení tepla a proudění*. 2. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008. 180 s. ISBN 978 – 80 – 248 – 1748 – 4.
- [15] REAY, D. A., KEW, P. A., McGlen R. J. *Heat pipes: Theory, Design and Applications*. 6th ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 2014. 251 p. ISBN 978 – 0 – 08 – 098266 – 3.
- [16] SAZIMA, Miroslav. *Sdílení tepla*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1986. 214 s. Učební texty VŠ, ČVUT - fak. strojní.
- [17] Traditional Liquid Cooling System. *sunonusa* [online]. © Sunon. [cit. 7. dubna 2015]. Dostupné z WWW: <http://www.sunonusa.com/index2.asp?f=news&p=pr_waturbo>
- [18] Velocity distribution and mesh diagram in accordance with the cross sections of CNPS – 9700. *openlab.cytitech.cuny* [online]. © 2012 Elsevier Ltd. [cit. 7. dubna 2015]. Dostupné z WWW: <<https://openlab.citytech.cuny.edu/envdesign/files/2012/09/A-new-CPU-cooler-design-based-on-an-active-cooling-heatsink-combined.pdf>>